



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

PROGRAMA DE POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS

ANÁLISIS DE LA TENDENCIA DE LA SEQUÍA POR EL MÉTODO DE RODIONOV

JANETH CORTEZ VILLA

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2019

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe: **Janeth Cortez Villa**, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor **Abel Quevedo Nolasco**, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis:

“ANÁLISIS DE LA TENDENCIA DE LA SEQUÍA POR EL MÉTODO DE RODIONOV”

y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 11 de diciembre de 2018.



Firma del
Alumno (a)



Dr. Abel Quevedo Nolasco

Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: **ANÁLISIS DE LA TENDENCIA DE LA SEQUÍA POR EL MÉTODO DE RODIONOV** realizada por la alumna: **JANETH CORTEZ VILLA** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DR. ABEL QUEVEDO NOLASCO

ASESOR (A)



DR. RAMÓN ARTEAGA RAMÍREZ

ASESOR (A)



M.C. GUILLERMO CARRILLO FLORES

ASESOR (A)



M.C. OMAR KAYAM VILLALPANDO BARRIGA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, enero de 2019

ANÁLISIS DE LA TENDENCIA DE LA SEQUÍA POR EL MÉTODO DE RODIONOV

Janeth Cortez Villa, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2019

RESUMEN

La sequía es el fenómeno natural que afecta a más personas en el mundo, hasta la última consecuencia, la muerte de plantas, animales y seres humanos. Para evaluar los posibles daños que causa, se desarrollaron índices de sequía que facilitan su análisis cuantitativo para realizar una planeación y manejo de los recursos hídricos. Sin embargo, actualmente se observan cambios en el sistema climático global que provocan condiciones de sequía de mayor intensidad, duración y frecuencia. Por lo que se realizó la detección de cambios con el método de Rodionov en los índices de sequía SPEI (Índice de Precipitación y Evapotranspiración Estandarizado) y SPI (Índice de Precipitación Estandarizada) a escalas de 6 y 12 meses en el estado de Durango, México. Se analizaron las tendencias de cambios en la media (RSI) y varianza (RSSI) en 49 estaciones del índice SPI de 6 meses y en 45 estaciones del índice SPEI de 6 meses. Los valores RSI identificaron el comienzo de los periodos de sequía, la mayoría de los valores máximos de RSI se presentaron en julio de 1992. Las tendencias de la frecuencia de valores RSI, disminuyó durante el periodo 2000-2004 y aumentó durante 2005-2008. La década de mayores cambios en la media fue 1990-1999. La mayor frecuencia de valores RSSI fue en el periodo 1985-1989, los cambios se mantuvieron constantes durante los últimos 20 años. La década de mayores cambios en la varianza fue de 1980-1989.

Palabras clave: Sequía, SPI, SPEI, Rodionov, cambios de media, cambios de varianza, Durango.

ANALYSIS OF THE DROUGHT TREND BY THE RODIONOV METHOD

Janeth Cortez Villa, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2019

ABSTRACT

Drought is a natural phenomenon that affects more people in the world, until the last consequence, the death of plants, animals, and humans. To evaluate the possible damages it causes, drought indices were developed that facilitate its quantitative analysis to carry out planning and management of water resources. However, there are current changes in the global climate system that cause drought conditions of greater intensity, duration, and frequency. Therefore, changes were detected with the Rodionov method in the SPEI (Precipitation Index and Standardized Evapotranspiration Index) and SPI (Standardized Precipitation Index) indices at 6 and 12-month scales in the state of Durango, Mexico. We analyzed the trends of changes in the mean (RSI) and variance (RSSI) in 49 stations of the SPI index of 6 months and 45 stations of the SPEI index of 6 months. The RSI values identified the beginning of the drought periods, most of the maximum values of RSI were presented in July 1992. Trends in the frequency of RSI values decreased during the period 2000-2004 and increased during 2005-2008. The decade of greatest changes in the average was 1990-1999. The highest frequency of RSSI values was in the period 1985-1989, the changes remained constant during the last 20 years. The decade of greatest change in variance was 1980-1989.

Keywords: Drought, SPEI, SPI, Rodionov, average changes, changes of variance, Durango.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el financiamiento de mi educación de postgrado a través del programa de becas nacionales y beca mixta en el extranjero.

Al Colegio de Postgraduados, especialmente al postgrado de Hidrociencias, por la oportunidad de desarrollo profesional y personal.

A los miembros de mi Consejo Particular, Dr. Abel Quevedo, Dr. Ramón Arteaga, M.C. Guillermo Carrillo y M.C. Omar Villalpando; por los conocimientos aportados para la realización de este trabajo.

A todas las personas, profesores, compañeros, amigos o familiares, quienes de alguna manera me han acompañado y apoyado hasta hoy, aún en la distancia.

CONTENIDO

RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
AGRADECIMIENTOS	VI
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE CUADROS	XI
1 INTRODUCCIÓN	1
2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS	2
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2.3 HIPÓTESIS GENERAL.....	2
2.4 HIPÓTESIS PARTICULARES	2
3 REVISIÓN DE LITERATURA	3
3.1 DEFINICIONES DE SEQUÍA.....	3
3.1.1 <i>Sequía meteorológica</i>	3
3.1.2 <i>Sequía agrícola</i>	4
3.1.3 <i>Sequía hidrológica</i>	4
3.1.4 <i>Sequía económica</i>	4
3.2 CAUSAS DE LA SEQUÍA	5
3.2.1 <i>Causas de origen natural</i>	5
3.2.2 <i>Causas de origen antropogénico</i>	6
3.3 EFECTOS DE LA SEQUÍA	6
3.4 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE LA SEQUÍA	8
3.4.1 <i>Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)</i>	9
3.4.2 <i>Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizado (SPEI)</i>	11
3.5 MÉTODO SECUENCIAL DE RODIONOV PARA DETECCIÓN DE CAMBIOS DE RÉGIMEN	14
4 MATERIALES Y MÉTODOS	18
4.1 ÁREA DE ESTUDIO	18
4.2 MATERIALES	21
4.2.1 <i>Base de datos climatológica</i>	21
4.2.2 <i>Información geográfica digital</i>	22
4.2.3 <i>Software</i>	22

4.3	MÉTODOS.....	23
4.3.1	<i>Selección de estaciones climatológicas y periodo de estudio</i>	23
4.3.2	<i>Control de calidad de datos climáticos</i>	24
4.3.3	<i>Cálculo de datos faltantes en las series climatológicas</i>	24
4.3.4	<i>Cálculo de índices de sequía</i>	28
4.3.5	<i>Análisis temporal y espacial</i>	29
4.3.6	<i>Comprobación de normalidad</i>	31
4.3.7	<i>Prueba t de Rodionov para detectar cambios de régimen</i>	32
4.3.8	<i>Detección de cambios en la media y varianza de los índices de sequía y análisis de tendencias</i>	34
5	RESULTADOS	35
5.1	INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA	35
5.2	ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES EN LAS SERIES CLIMÁTICAS	38
5.3	ÍNDICES DE SEQUÍA.....	39
5.4	ANÁLISIS TEMPORAL DE ÍNDICES DE SEQUÍA.....	44
5.5	ANÁLISIS ESPACIAL DE ÍNDICES DE SEQUÍA	51
5.6	PRUEBA DE NORMALIDAD	58
5.7	DETECCIÓN DE CAMBIOS DE RÉGIMEN EN LA MEDIA Y VARIANZA DE LOS ÍNDICES DE SEQUÍA CON EL MÉTODO DE RODIONOV	62
5.8	ANÁLISIS DE TENDENCIAS EN LOS CAMBIOS DE MEDIA Y VARIANZA	78
6	CONCLUSIONES	87
7	LITERATURA CITADA	88
	ANEXOS	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Estados afectados por la sequía en diferentes periodos.....	7
Figura 3.2. Distribución normal estándar de SPI con media cero y varianza uno .	11
Figura 4.1. Ubicación del estado de Durango	18
Figura 4.2. Distribución climática en el estado de Durango	19
Figura 4.3. Distribución pluvial promedio anual en el estado de Durango.....	21
Figura 4.4. Cálculo de total de frecuencias por índice de sequía	30
Figura 4.5. Parámetros usados en la prueba de detección de cambios de régimen	33
Figura 5.1. Histograma de frecuencia de estaciones para datos faltantes	35
Figura 5.3. Método utilizado para estimar datos faltantes por elemento climático	39
Figura 5.4. Código en RStudio para el cálculo de índices de sequía	40
Figura 5.5. Resultados del cálculo de índices de sequía con RStudio para la estación 10121 Los Altares	40
Figura 5.6. Frecuencia mensual de las categorías de los índices SPEI y SPI (1979-2008).....	45
Figura 5.7. Estaciones climatológicas que presentaron algún tipo de sequía con el índice SPEI de 6 meses (1979-2008).....	47
Figura 5.8. Estaciones climatológicas que presentaron algún tipo de sequía con el índice SPI de 6 meses (1979-2008)	48
Figura 5.9. Estaciones climatológicas que presentaron algún tipo de sequía con el índice SPEI de 12 meses (1979-2008).....	49
Figura 5.10. Estaciones climatológicas que presentaron algún tipo de sequía con el índice SPI de 12 meses (1979-2008)	50
Figura 5.11. Distribución espacial de la sequía de los índices SPEI y SPI de 6 meses en Oct-79.....	51
Figura 5.13. Distribución espacial de la sequía de los índices SPEI y SPI de 6 meses en Ago-82	53
Figura 5.14. Distribución espacial de la sequía de los índices SPEI y SPI de 6 meses en May-99.....	53
Figura 5.15. Distribución espacial de la sequía de los índices SPEI y SPI de 6 meses en Ene-00	54
Figura 5.17. Distribución espacial de la sequía de los índices SPEI y SPI de 12 meses en Ago-80	55

Figura 5.18. Distribución espacial de la sequía de los índices SPEI y SPI de 12 meses en Oct-82.....	56
Figura 5.19. Distribución espacial de la sequía de los índices SPEI y SPI de 12 meses en Sep-89.....	57
Figura 5.20. Distribución espacial de la sequía de los índices SPEI y SPI de 12 meses en Mar-96.....	57
Figura 5.21. Prueba de cambios de régimen en la media con complemento de Excel.....	62
Figura 5.22. Prueba de cambios de régimen en la varianza con el complemento de Excel.....	63
Figura 5.23. Distribución espacial de la frecuencia de valores RSI durante el periodo 1979-2008 en el Estado de Durango.....	67
Figura 5.24. Distribución espacial de la frecuencia de valores RSSI durante el periodo 1979-2008 en el Estado de Durango.....	68
Figura 5.25. Valores de cambio RSI y RSSI para el índice SPEI de 6 meses en la estación10087 Vascogil ubicada al Oeste del Estado.....	69
Figura 5.26. Valores de cambio RSI y RSSI para el índice SPI de 6 meses en la estación10087 Vascogil ubicada al Oeste del Estado.....	70
Figura 5.27. Valores de cambio RSI y RSSI para el índice SPEI de 6 meses en la estación10078 Sardinias ubicada al Norte del Estado.....	71
Figura 5.28. Valores de cambio RSI y RSSI para el índice SPI de 6 meses en la estación10078 Sardinias ubicada al Norte del Estado.....	72
Figura 5.29. Valores de cambio RSI y RSSI para el índice SPEI de 6 meses en la estación10045 Mapimí ubicada al Noreste del Estado.....	73
Figura 5.30. Valores de cambio RSI y RSSI para el índice SPI de 6 meses en la estación10045 Mapimí ubicada al Noreste del Estado.....	74
Figura 5.31. Valores de cambio RSI y RSSI para el índice SPEI de 6 meses en la estación10047 Narciso Mendoza ubicada al Sureste del estado.....	75
Figura 5.32. Valores de cambio RSI y RSSI para el índice SPI de 6 meses en la estación10047 Narciso Mendoza ubicada al Sureste del estado.....	76

LISTA DE CUADROS

Cuadro 3.1. Clasificación del SPI	11
Cuadro 5.1. Características generales de las estaciones CNA-SMN seleccionadas	36
Cuadro 5.2. Estadísticas generales del índice SPEI por estación meteorológica .	41
Cuadro 5.3. Estadísticas generales del índice SPI por estación meteorológica....	42
Cuadro 5.4. Valores p obtenidos de la prueba K-S-L y resultado de la prueba de hipótesis de normalidad	59
Cuadro 5.5. Resumen de valores RSI y RSSI para el índice SPEI de 6 meses....	63
Cuadro 5.6. Resumen de valores RSI y RSSI para el índice SPI de 6 meses	65
Cuadro 5.7. Frecuencia quinquenal de los valores de cambio de media y varianza para el índice SPEI de 6 meses.....	79
Cuadro 5.8. Frecuencia quinquenal de los valores de cambio de media y varianza para el índice SPI de 6 meses.....	81
Cuadro 5.9. Frecuencia decadal de los valores de cambio de media y varianza para el índice SPEI de 6 meses	83
Cuadro 5.10. Frecuencia decadal de los valores de cambio de media y varianza para el índice SPI de 6 meses	85

1 INTRODUCCIÓN

La sequía es un fenómeno climático que ha afectado a la humanidad a través de la historia (Heim, 2002), actualmente se considera como el fenómeno natural que afecta a más personas en el planeta (Ortega, 2013). En México el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) indica que la sequía es de los eventos más costosos para el país (Ibarrarán & Rodríguez, 2007).

Una sequía no se puede predecir, pero se puede realizar una planeación y manejo adecuado de los recursos hídricos que permita disminuir los daños que causa (Cancelliere & Salas, 2010). Para ello es necesario un análisis a detalle del fenómeno, lo que ha llevado a generar métodos e índices que tienen por objetivo su caracterización desde diferentes perspectivas (Hounam, Burgos, Kalik, Palmer & Rodda, 1975).

Los índices de sequía facilitan el análisis cuantitativo de la intensidad, duración y frecuencia del fenómeno; que, en conjunto con datos sobre sectores expuestos y vulnerables, aporta información útil para la gestión de riesgos en los grupos afectados, así mismo, permiten una referencia histórica de la probabilidad de que se produzcan o repitan sequías de distintos niveles de intensidad (Organización Meteorológica Mundial, 2016).

Sin embargo, estos análisis serán válidos cuando se tenga una comprensión adecuada del régimen climático del lugar, hecho que actualmente es más complicado de conseguir, ya que el sistema climático se está afectando por el “calentamiento global” que surgió desde hace algunas décadas (Campos, 2016), alterando las tendencias históricas del clima en el planeta.

En este trabajo se caracteriza el comportamiento espacial y temporal de la sequía con el Índice de precipitación estandarizada (SPI) y el Índice de precipitación y evapotranspiración estandarizado (SPEI) en el Estado de Durango, México (con áreas muy afectadas por la sequía). Se aplicó el método secuencial desarrollado por Rodionov (2004) para detectar cambios en la media y varianza de los índices de sequía e identificar tendencias de mayor o menor frecuencia de ocurrencia de cambios durante los últimos años.

2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivo general

Analizar las tendencias de media y varianza de los índices de sequía Índice de precipitación estandarizada (SPI) e Índice de precipitación y evapotranspiración estandarizado (SPEI) con el método de Rodionov para detectar cambios en el régimen climático en el estado de Durango, México.

2.2 Objetivos específicos

- Evaluar el fenómeno de la sequía por medio de los índices de sequía SPI y SPEI.
- Caracterizar el comportamiento espacial y temporal del fenómeno de la sequía en el Estado de Durango.
- Analizar las tendencias de los cambios en la media y varianza de los índices de sequía por medio de un método para detectar cambios en el régimen climático desarrollado por Rodionov.

2.3 Hipótesis general

El método de Rodionov permitirá detectar los cambios en el régimen climático (media y varianza) con los índices de sequía: Índice de precipitación estandarizada (SPI) e Índice de precipitación y evapotranspiración estandarizado (SPEI, en el tiempo en el estado de Durango, México.

2.4 Hipótesis particulares

- El índice de sequía SPI presentará mayor variación espacio temporal con respecto al SPEI.
- Por medio del método de Rodionov se detectará cambios en la tendencia de los régimen climático (media y varianza de los índices de sequía) en el estado de Durango.

3 REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Definiciones de sequía

Existe una gran diversidad de formas en que los diferentes campos del conocimiento estudian a la sequía (Yevjevich, 1967). Que se pueden clasificar en dos grupos: conceptuales y operacionales.

Las conceptuales son para identificar los límites de la sequía (Wilhite & Glantz, 1985). Por ejemplo:

- Tiempo seco de larga duración (Real Academia Española, 2014).
- Un período prolongado de lluvias anormalmente bajas, que conduce a una escasez de agua (Oxford Dictionary, 2018).
- Período prolongado de precipitación deficiente que da lugar a un daño extenso a los cultivos, dando como resultado una pérdida de rendimiento (Wolchover, 2014).
- Ausencia prolongada o escasez acusada de precipitación (WMO & UNESCO, 1998).

Las definiciones operacionales identifican el inicio, intensidad y terminación de los episodios de sequía. Wilhite & Glantz (1985) realizaron una revisión de más de 150 definiciones publicadas hasta ese año e hicieron una discusión agrupada en cuatro tipos: meteorológica, agrícola, hidológica y económica.

El INIFAP (2016) presentó un resumen de estas definiciones en el estudio sobre vulnerabilidad e impacto en la región centro-norte de México, en donde se muestra una idea general del enfoque que se consideró al explicar cada una de ellas, así como periodos y efectos que conllevan. A continuación se presenta un resumen de estas deficiones.

3.1.1 Sequía meteorológica

Es la de menor duración y se caracteriza por la falta de lluvias por unas cuantas semanas. Presenta consecuencias meteorológicas como temperaturas altas, baja humedad y vientos fuertes. Es la irregularidad de lluvia en periodos que normalmente serian lluviosos.

3.1.2 Sequía agrícola

Está relacionada con la duración del desarrollo fenológico de los cultivos y es de carácter estacional, es decir, que se presenta en una estación o periodo que normalmente es lluvioso. Su principal característica es el escaso nivel de humedad en el suelo, que disminuye el desarrollo vegetativo y lleva a una reducción en los rendimientos.

La sequía en periodos tempranos afecta el periodo de siembra, mientras que, en etapas avanzadas, puede disminuir drásticamente la densidad de los cultivos y su rendimiento. Por tanto, este tipo de sequía es de los que afecta a los sectores más vulnerables, ya que la disminución o ausencia de la lluvia puede significar un año completo sin la producción agrícola de temporal. Esta sequía se puede catalogar como de duración media o de mediano plazo.

3.1.3 Sequía hidrológica

Este tipo de sequía puede durar desde uno hasta varios años. Se caracteriza por una evidente baja en los niveles de los ríos, presas y acuíferos, ya sea caudal y/o volumen. Puede causar daños severos a la población, ya sea a los sectores sociales más desarrollados que han hecho grandes inversiones o a los pequeños productores dada su menor capacidad de resistir la emergencia, ya que los efectos y la recuperación son a largo plazo.

3.1.4 Sequía económica

Este tipo de sequía se relaciona con los efectos de pérdida de ingreso y de productividad en aquellas actividades que tienen al agua como insumo. Esta se relaciona con el grado de dependencia del recurso en tiempo y volumen, de las necesidades mínimas a satisfacer, de su importancia como insumo en los procesos productivos, entre otros.

La economía, es probablemente donde el impacto de la sequía es más acusado y severo, ya que afecta a todos los sectores sociales y productivos. La vulnerabilidad es mayor en cuanto menor es la capacidad de resistencia de los afectados, entendiendo a la vulnerabilidad como las opciones o alternativas que permitan sostener el ingreso a través de darle otro uso al agua o de utilizarla de manera más eficiente.

3.2 Causas de la sequía

Las causas de las sequías son muy diversas. Por lo general se han aceptado dos categorías para agruparlas: las de origen natural y las de origen antropogénico (Ortega, 2013). A continuación, se describen brevemente estos grupos.

3.2.1 Causas de origen natural

Una gran extensión del territorio nacional mexicano se encuentra en la franja de alta presión de latitud Norte, por lo que existen zonas áridas y semiáridas, caracterizadas por su precipitación anual y humedad relativa bajas (Granados, Sánchez, Granados & Borja, 2011), en consecuencia la humedad disponible por lo general es insuficiente para mantener el potencial vegetativo y de actividades económicas regionales o locales (Ortega, 2013).

Por otra parte, estudios recientes presentan evidencias de que la actividad solar tiene influencia en el clima terrestre mediante una conexión entre la estratósfera y la troposfera como influencia de los ciclos solares (González, 2015). En la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se desarrolló un Modelo que predice sequías e inundaciones a partir de manchas solares, se obtuvo a partir de la relación de la ocurrencia de tres grandes sequías en el Norte de México y Estados Unidos cuyos registros coinciden con los de inundaciones en el Sureste mexicano, y estos a su vez con la baja actividad del Sol (Flores Fuentes, 2018).

En los años 50 y 60 se describió el fenómeno Niño/Oscilación del Sur (que hasta entonces eran dos fenómenos explicados por separado), cuando se produce la corriente de El Niño, la diferencia de presión Este-Oeste disminuye tanto que los vientos alisios se colapsan en el Pacífico occidental, y el agua caliente allí acumulada, regresa al Este, como una corriente que se propaga a lo largo del Pacífico en forma de ondas, y llega hasta Sudamérica, donde eleva la temperatura del agua (Landa, Magaña & Neri, 2008).

La corriente de El Niño ocasiona los mayores y más rápidos cambios en los patrones normales del clima. Su aparición va seguida de años calurosos y sequías en la India y en Australia, alteración del viento y lluvia en los trópicos; produce grandes temporales en el Pacífico medio y afecta la corriente fría del Noroeste de Sudamérica (peruana). En México tiene grandes impactos en los patrones de variabilidad de la precipitación, las lluvias de invierno se intensifican en los años que

ocurre El Niño y se debilitan durante los veranos correspondientes. Durante veranos de El Niño, las lluvias en la mayor parte de México disminuyen, apareciendo condiciones de sequía (Ortega, 2013).

3.2.2 Causas de origen antropogénico

Actualmente se reconoce que las actividades humanas están alterando el estado natural del planeta. Principalmente la quema de combustibles fósiles que se realizan diariamente por la mayoría de la población mundial, traen como consecuencia el incremento en la concentración de gases invernadero en la atmósfera. Entre 1971 y el año 2005, la emisión mundial derivada del consumo de estos combustibles aumentó alrededor de 90% (SEMARNAT, 2009a).

Actividades antropogénicas como la deforestación, el sobrepastoreo, la expansión de áreas agrícolas hacia áreas frágiles y la sobreexplotación de la vegetación para uso doméstico tienen como consecuencia la degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas. La sobrepoblación humana y de animales intensifica el agotamiento del agua subterránea (Granados, *et al.*, 2011).

Las emisiones de gases de efecto invernadero, o cambios en el uso de suelo, modifican ciertos procesos meteorológicos que se vinculan con la lluvia y la temperatura. Todos los elementos del tiempo y el clima están conectados entre sí, así que al alterar uno de estos se originan cambios en los demás. Por ello, las modificaciones de origen antropogénico han tenido un papel relevante en la presencia de anomalías hidrometeorológicas en los últimos años, entre las cuales se encuentran la mayor frecuencia y severidad de las sequías (Ortega, 2013).

3.3 Efectos de la sequía

Los efectos de la sequía son muy variados, y en su última consecuencia puede traer la muerte de plantas y animales, e inclusive de seres humanos. Afectan el aspecto económico y social, ya que las pérdidas en cosechas, ganado o disminución de la producción industrial, ocasionan la migración obligada de la fuerza laboral hacia otras regiones menos afectadas (CENAPRED, 2002).

La sequía no es un fenómeno espectacular como otros eventos naturales (un huracán o un tornado, por ejemplo), sin embargo, sus impactos a largo plazo suelen ser de mayor amplitud y más devastadores (Ortega, 2013).

En México han ocurrido sequías de gran magnitud desde tiempos antiguos. Se han registrado cuatro grandes periodos de sequías, estos son: 1948 - 1954, 1960 - 1964, 1970 - 1978 y 1993 - 1996 (figura 3.1). Los Estados con más efectos desfavorables han sido Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León, Baja California, Sonora, Sinaloa, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo y Tlaxcala (CENAPRED, 2001).

En el estado de Durango, durante los cuatro grandes periodos de sequía se perdieron un millón de árboles por incendios forestales, los almacenamientos de agua llegaron a encontrarse al 19% de su capacidad, se perdieron más de mil millones de pesos al dejar de cosecharse algodón, maíz y frijol. La población sufrió escasez de agua potable y el aumento de los precios en artículos de primera necesidad (CENAPRED, 2002).

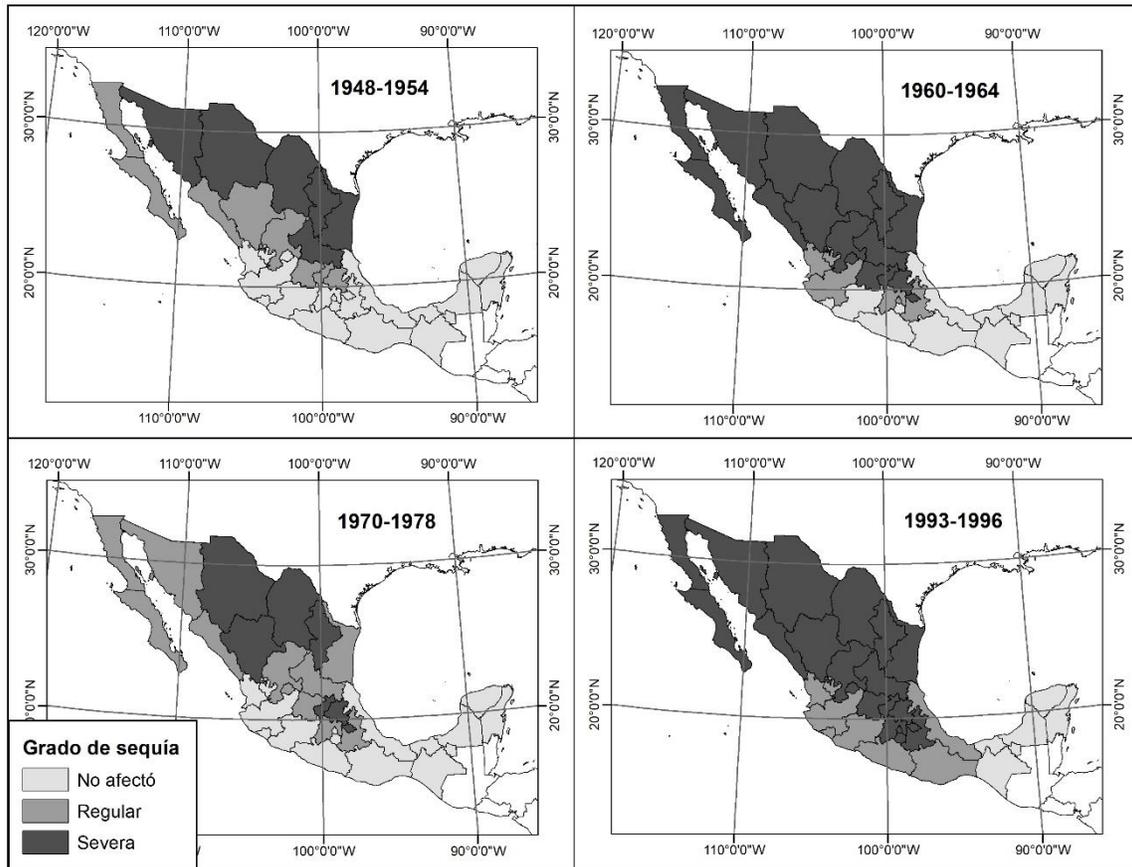


Figura 3.1. Estados afectados por la sequía en diferentes periodos.

FUENTE: Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México. CENAPRED (2001).

El año 1998 fue crítico, las sequías ocurrieron prácticamente en todo el país, en Durango 80 mil familias sufrieron sus efectos, se dejaron de sembrar 640 mil hectáreas de cultivos básicos, murieron 8 mil cabezas de ganado, así como 22 personas por hambre y sed. La iglesia donó el 40% del diezmo para apoyar a agricultores afectados. Durante los años 1999 y 2000 la situación no fue mejor, se perdió el 20% de las áreas frutícolas, murieron más de 10 mil cabezas de ganado, algunas presas llegaron a niveles entre 5% y 9% de almacenamiento (CENAPRED, 2002).

3.4 Métodos de análisis de la sequía

No es posible realizar una caracterización única de la sequía; ya que, su análisis depende de la percepción para cada sector; es decir, su ocurrencia depende de la interacción entre la disponibilidad natural del agua y el uso previsto de esta (Goldman, 1985). Dracup, *et al.* (1980) presentan los siguientes aspectos generales, para que se utilicen por todas las disciplinas.

- Determinar la naturaleza del déficit de agua. Qué tipo de sequía se requiere analizar y de que información se dispone y cual es necesaria.
- Identificar el tiempo y periodos de análisis. De acuerdo con el tipo de sequía, los periodos de análisis pueden ser diarios, semanales, mensuales, estacionales, anuales, etc.
- Establecer un nivel de truncamiento (NT) acorde con los dos puntos anteriores, que refleje la realidad de la demanda respecto a los suministros disponibles, que refleje la realidad de la demanda respecto a los suministros disponibles. Este NT es la referencia que distingue los eventos altos (excesos) de los bajos (sequías), también conocido como umbral o nivel de referencia.
- Estimar el alcance regional del fenómeno, ya que, por lo general, la sequía abarca grandes áreas geográficas y el análisis de unos pocos sitios puede ser insuficiente para apreciar su dimensión real.

Cuando se definen estos aspectos, se tiene un punto de partida para realizar la descripción de las condiciones de las sequías, lo cual se hace con índices o indicadores de sequía.

Los indicadores son variables o parámetros como la precipitación, la temperatura, los caudales fluviales, los niveles de las aguas subterráneas y de los embalses, la humedad del suelo o el manto de nieve. Los índices son representaciones numéricas determinadas a partir de datos climáticos o hidrometeorológicos, que tienen por objeto analizar las sequías en un período de tiempo determinado. Desde el punto de vista técnico, los índices también son indicadores (OMM, 2016).

No hay ningún índice o indicador que se pueda atribuir y ser aplicado a todos los tipos de sequía, regímenes climáticos y sectores afectados por las sequías (OMM, 2016). Para la selección del índice más adecuado a una zona de estudio, se debe realizar una investigación de aquellos que ya han sido probados y los que de acuerdo con la información que se tenga se puedan aplicar. En este caso, se han seleccionado el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) y el Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizado (SPEI) y se describen a continuación.

3.4.1 Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)

Este método se desarrolló en la Universidad Estatal de Colorado, con el objetivo de cuantificar los impactos del déficit de precipitación sobre los diferentes recursos hidrológicos: agua subterránea, agua almacenada, corrientes de agua y humedad del suelo; se asume que estos son respuesta a las anomalías de precipitación de un periodo de tiempo (Rivera del Río, 2005).

El índice se define con base en la precipitación estandarizada, que es simplemente la diferencia de precipitación con respecto a su media para un período de tiempo específico dividido por la desviación estándar donde la media y la desviación estándar se determinan a partir de registros pasados (Mckee, *et al.*, 1993).

El SPI se puede obtener para para diferentes periodos, desde un mes en adelante, aunque lo más usual es hacerlo a 3, 6, 12, 24, 36 y 48 meses. Estos representan escalas de tiempo arbitrarias, aunque típicas para que los déficit de precipitación afecten a los diferentes recursos hidrológicos (Campos, 2016).

Se calcula con base a un conjunto de datos mensuales de precipitación, el cual se está moviendo en el sentido de que cada mes se determina un nuevo valor a partir de los meses anteriores. Cada uno de los conjuntos de datos se ajustan a la función

Gamma para definir la relación entre la probabilidad y la precipitación. (Mckee, *et al.*, 1993).

El interés principal de la aplicación de la función Gamma en análisis climáticos es su integral, de la que se obtienen probabilidades de ocurrencia de una precipitación menor o igual que una precipitación (X) determinada. Dicha integral recibe el nombre de función de densidad de probabilidades acumulativas, que se expresa como:

$$G(X) = \int_0^X g(X)dX = \frac{1}{\hat{\beta}^{\alpha}\Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^X X^{\hat{\alpha}-1} e^{-X/\beta} dX \quad (1)$$

Puesto que la función Gamma es indefinida para valores de X=0 y una serie de datos de precipitación tiene ceros, con mayor frecuencia en regiones áridas y semiáridas, la probabilidad acumulativa se convierte en:

$$H(X) = q + (1 - q) * G(X) \quad (2)$$

Donde q es la probabilidad de que ocurra un cero; q=m/n, donde m es el número de ceros en una serie de tiempo y n el total de datos en la serie; 1-q es la probabilidad de que no ocurra cero.

Con el propósito de facilitar la obtención del índice SPI, la probabilidad acumulada H(X), se transforma a una variable normalizada Z (con media cero y varianza uno); que representa el valor de SPI.

Los valores de Z se calculan mediante una aproximación que convierte la probabilidad acumulada Gamma a un valor de probabilidad estándar normal o variable Z:

La estandarización con media cero y varianza uno (figura 3.2), permite realizar comparaciones entre sitios y a diferentes escalas de tiempo. El SPI representa la probabilidad acumulada de que ocurra una desviación de la precipitación, en relación con un periodo base, donde los parámetros de gamma fueron estimados.

Mckee *et al.*, (1993) utilizaron un sistema de clasificación para definir intensidades de sequía (cuadro 3.1) y definieron criterios para cuando ocurre un evento de sequía, para cualquier escala de tiempo:

- Un evento de sequía ocurre, sí el SPI es continuamente negativo y alcanza una intensidad de -1.0 o menor.
- Un evento de sequía termina cuando el SPI llega a ser positivo.
- Cada evento de sequía tiene un principio, un fin e intensidad.

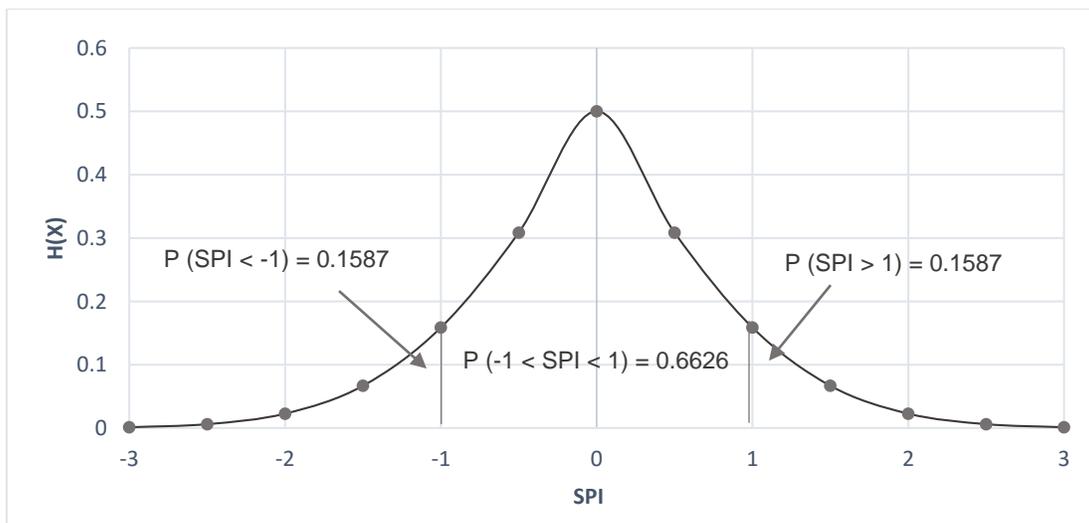


Figura 3.2. Distribución normal estándar de SPI con media cero y varianza uno

Cuadro 3.1. Clasificación del SPI

Valor SPI	Categoría del SPI
2 o mayor	Extremadamente húmedo
1.5 a 1.99	Muy húmedo
1.0 a 1.49	Moderadamente húmedo
-0.99 a 0.99	Cercano a lo normal
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco
-1.5 a -1.99	Muy seco
-2 o menor	Extremadamente seco

3.4.2 Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizado (SPEI)

El SPEI se desarrolló en el año 2010, es un índice simple de sequía multiescalar que combina datos de precipitación y temperatura; que funciona con base en el

procedimiento original de cálculo del SPI. El SPEI utiliza la diferencia mensual (o semanal) entre la precipitación y evapotranspiración (PET). Esto representa un balance hídrico climático simple que se fija en diferentes escalas de tiempo para obtener el SPEI (Vicente, Beguería & López, 2010).

El primer paso es el cálculo de PET, que resulta difícil por la cantidad de parámetros que intervienen en el proceso.

El método estándar para calcular PET designado por diferentes organizaciones internacionales es el método de Penman–Monteith, para su cálculo se involucra valores de radiación solar, temperatura, velocidad del viento y humedad relativa (Allen, *et al.*, 1998). En la mayoría de las regiones del mundo, estos datos meteorológicos no están disponibles. Por lo tanto, se han propuesto ecuaciones empíricas alternativas para el cálculo de PET donde los datos son escasos (Vicente, *et al.*, 2010).

Mavromatis (2007) evaluó algunos métodos complejos y sencillos de PET, en el cálculo de índices de sequía como el Índice de severidad de la sequía de Palmer (PDSI), concluyó que los resultados obtenidos son similares. El objetivo de incluir PET en el cálculo del índice de sequía es obtener una estimación temporal relativa, y por lo tanto, el método utilizado para calcular el PET no es crítico, es decir, que SPEI no se encuentra vinculado con ningún método en particular (Vicente, *et al.*, 2010).

Una vez obtenido un valor para PET, el segundo paso es obtener el balance hídrico climático, que es la diferencia entre la precipitación P y PET para el mes i , que se calcula con la ecuación 12.

$$D_i = P_i - PET_i \quad (3)$$

Proporciona una medida simple del superávit o déficit de agua para el mes analizado (Vicente, *et al.*, 2010).

Los valores calculados D_i se agrupan en diferentes escalas de tiempo, siguiendo el mismo procedimiento que para el SPI (Campos, 2016).

Para el cálculo del SPI a diferentes escalas de tiempo, se usa una distribución de probabilidad de la familia gamma (las distribuciones de dos parámetros gamma o de tres parámetros de Pearson III), porque las frecuencias de precipitación

acumuladas a diferentes escalas de tiempo se pueden modelar por estas distribuciones estadísticas. El SPI se puede calcular al utilizar una distribución de dos parámetros, como la distribución gamma, sin embargo, para calcular SPEI se necesita una distribución de tres parámetros. En las distribuciones de tres parámetros, x puede tener valores negativos, que son comunes en la serie D (Vicente, *et al.*, 2010).

La selección de la distribución estadística para modelar la serie D se realiza a partir de cuatro distribuciones: Pearson III, Lognormal, Log-logística y General de Valores Extremos, con base en el comportamiento de los valores más extremos. La distribución Log-Logística mostró una disminución gradual en la curva para valores bajos, y las probabilidades coherentes se obtuvieron para valores muy bajos de D, correspondientes a una ocurrencia de 200 a 500 años. Además, no se encontraron valores por debajo del parámetro de origen de la distribución (Campos, 2016).

La función de distribución de probabilidad de la serie D, de acuerdo con la distribución log-logística, está dada por:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (4)$$

Con $F(x)$, el SPEI se pueden obtener los valores estandarizados de $F(x)$. Por ejemplo, siguiendo la aproximación clásica de Abramowitz, Stegun & Miller (1965):

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3} \quad (5)$$

Dónde:

$$W = \sqrt{-2 \ln(P)} \quad (6)$$

Para $P \leq 0.5$, P es la probabilidad de que se supere un valor determinado D, $P=1-F(x)$. Si $P > 0.5$, P se sustituye por $1-P$ y el resultado del SPEI se invierte. Las constantes son: $C_0 = 2.515517$, $C_1 = 0.802853$, $C_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001308$. El valor medio del SPEI es cero, y la desviación estándar es de 1. El SPEI es una variable estandarizada, y por lo tanto se puede comparar con otros valores de SPEI a lo largo del tiempo y el espacio. Un SPEI de

cero indica un valor correspondiente al 50% de la probabilidad acumulativa de D, de acuerdo con una distribución log-logística.

3.5 Método secuencial de Rodionov para detección de cambios de régimen

Un cambio gradual en el sistema climático mundial a fines de la década de 1970 volvió popular los términos “régimen” y “cambios de régimen”, derivados de la interpretación de las variaciones a largo plazo en los registros climáticos y biológicos (Rodionov, 2005). Los cambios de régimen son reorganizaciones rápidas de los ecosistemas de un estado relativamente estable a otro (Rodionov & Overland, 2005).

Los cambios en el clima pueden ocurrir de forma gradual hacia un nuevo estado, una serie de oscilaciones a largo plazo o una secuencia de saltos abruptos. Si bien, estas variaciones en el clima son ciertamente naturales, algunos componentes podrían estar asociados con efectos antropogénicos (Miller, *et al.*, 1994).

Se han desarrollado varios métodos para detectar un cambio de régimen, o discontinuidad, en series de tiempo. Típicamente, estos métodos emplean técnicas estadísticas estándar, como las pruebas de Student o Mann-Kendall, o sus modificaciones (Rodionov, 2004).

Un problema común de los métodos existentes para la detección de cambio de régimen es su bajo rendimiento al final de las series temporales. En consecuencia, los cambios en los índices ambientales y biológicos generalmente se detectan mucho después de su aparición real (Rodionov & Overland, 2005).

Rodionov (2004), propone como solución el uso de una técnica de procesamiento de datos secuencial. En este tipo de análisis, el número de observaciones no es fijo, es decir, las observaciones vienen en secuencia. Para cada nueva observación, se realiza una prueba para determinar la validez de la hipótesis nula H_0 (en este caso, la existencia de un cambio de régimen). Hay tres posibles resultados de la prueba: aceptar H_0 , rechazar H_0 o seguir realizando la prueba.

La metodología se propuso con base en considerar una serie de tiempo con datos nuevos que llegan regularmente para aumentar la extensión temporal de la serie,

x_1, x_2, \dots, x_i (Jacques, 2009). Cuando llega una nueva observación, se realiza una comprobación para determinar si representa una desviación estadísticamente significativa del valor medio del régimen actual. Si lo hace, ese año se marca como un posible punto de cambio c , y las observaciones posteriores se utilizan para confirmar o rechazar esta hipótesis. La hipótesis se prueba usando el índice de cambio de régimen (RSI), que se calcula para cada c :

$$RSI_c = \sum_{i=c}^{c+m} \frac{x_i^*}{l\sigma_l} \quad (7)$$

Donde $m = 0, \dots, l - 1$ (es decir, el número de años desde el inicio de un nuevo régimen), l es la longitud de corte de los regímenes a probar, y σ_l es la desviación estándar promedio para todos los intervalos de un año en las series de tiempo. RSI representa una suma acumulativa de desviaciones normalizadas x_i^* del nivel medio hipotético para el nuevo régimen (\bar{x}_{nvo}), para el cual la diferencia, del nivel medio para el régimen actual (\bar{x}_{act}) es estadísticamente significativa de acuerdo con una prueba t de Student.

$$dif = \bar{x}_{nvo} - \bar{x}_{act} = t \sqrt{2\sigma_l^2/l} \quad (8)$$

Donde t es el valor de la distribución t-student con $2l - 2$ grados de libertad a un nivel de probabilidad p dado. Si, en cualquier momento desde el comienzo del nuevo régimen, el RSI se vuelve negativo, la prueba falla y se asigna un valor cero. Si el RSI permanece positivo durante $l - 1$, entonces c , se explica como el tiempo de un cambio de régimen en el nivel $\leq p$. La búsqueda del próximo cambio de régimen comienza con $c + 1$ para garantizar que su sincronización se detecte correctamente, incluso si la duración real del nuevo régimen es < 1 año.

El valor promedio del régimen actual \bar{x}_{act} se calcula para el periodo $(c - l, c)$. Se calcula para el periodo desde el cambio de régimen anterior al punto inmediatamente anterior al punto actual en el tiempo. Como resultado, se produce una función gradual de los regímenes en casi todos los casos, y no solo para cambios abruptos en el régimen.

Para mejorar el rendimiento al comienzo de las series temporales, la prueba para un cambio de régimen no comienza desde x_{l+1} , sino desde x_2 . El valor promedio

\bar{x}_{act} se calcula para todo el periodo inicial $[1, l]$, pero si se produjo un cambio de régimen antes de $i = l$, se detecta.

Los cambios en la varianza de los parámetros climáticos pueden tener un impacto similar o incluso mayor en los ecosistemas que los cambios en la media. Como los cambios climáticos debidos a causas naturales o impacto humano, pueden ser los cambios en la frecuencia de los peligros o los eventos extremos que representan el peligro más imitado que el aumento del "calentamiento global" (Rodionov, 2005).

Rodionov (2005) desarrolló una extensión del método que detecta cambios en la media para detectar cambios en la varianza, el procedimiento es similar al de la media, excepto que se basa en la prueba F en lugar de la prueba t. La metodología se describe a continuación.

Se supone que el valor medio de la serie de tiempo es cero, es decir, se trabaja con los residuales $\{z_i\}$ después de que los cambios en la media se eliminan de la serie de tiempo original $\{x_i\}$. La prueba F consiste en comparar la relación de las varianzas muestrales para dos regímenes con el valor crítico F_{crit} :

$$F = \frac{s_{act}^2}{s_{nvo}^2} > F_{crit} \quad (9)$$

Aquí F_{crit} es el valor de la distribución F con \hat{v}_1 y v_2 grados de libertad (donde $\hat{v}_1 = v_2 = l - 1$) y un nivel de significancia p (prueba de dos colas):

$$F = F(p/2, \hat{v}_1, v_2) \quad (10)$$

La varianza s_{act}^2 es la suma de cuadrados de z_i , donde i se extiende desde el punto de cambio anterior en la varianza (que es el primer punto del régimen "actual") hasta $i = t_{act} - 1$. En el momento "actual" t_{act} , la varianza s_{nvo}^2 es desconocida. Para que el nuevo régimen sea estadísticamente diferente del régimen actual, la varianza s_{nvo}^2 debe ser igual o mayor que la varianza crítica $s_{crit}^{2\uparrow}$, si la varianza está aumentando, o es igual o menor que $s_{crit}^{2\downarrow}$, si la varianza está disminuyendo, donde:

$$s_{crit}^{2\uparrow} = s_{act}^2 F_{crit} \quad (11)$$

$$s_{crit}^{2\downarrow} = s_{act}^2 / F_{crit} \quad (12)$$

Si en el momento t_{act} el valor actual z_{act} cumple una de las siguientes condiciones, $z_{act}^2 > s_{crit}^{2\uparrow}$ o $z_{act}^2 < s_{crit}^{2\downarrow}$, este tiempo se marca como un punto de cambio potencial y los valores subsiguientes $z_{act+1}, z_{act+2} \dots$ se utilizan para verificar esta hipótesis. La verificación se basa en el índice de suma de cuadrados residual (RSSI) definido como:

$$RSSI = \frac{1}{l} \sum_{i=t_{act}}^m (z_i^2 - s_{crit}^2), \quad m = t_{act}, t_{act} + l, \dots, t_{act} + l - 1 \quad (13)$$

La regla de decisión es similar a la de los cambios en la media: si en cualquier momento durante el período de prueba de t_{act} a $t_{act} + l - 1$ el índice se vuelve negativo, en el caso de $s_{crit}^2 = s_{crit}^{2\downarrow}$, o positivo, la hipótesis nula sobre la existencia de un cambio en la varianza en el momento t_{act} se rechaza, y el valor z_{act} se incluye en el régimen "actual". Por otra parte, el momento t_{act} se declara un punto de cambio c .

4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Área de estudio

El estado de Durango se ubica en la porción Noroeste de México y representa el 6.3% de la superficie del país con 123, 367 km². Colinda con los Estados de Chihuahua, Coahuila, Zacatecas, Nayarit y Sinaloa (figura 4.1). Se divide políticamente en 39 municipios (INEGI, 2017).

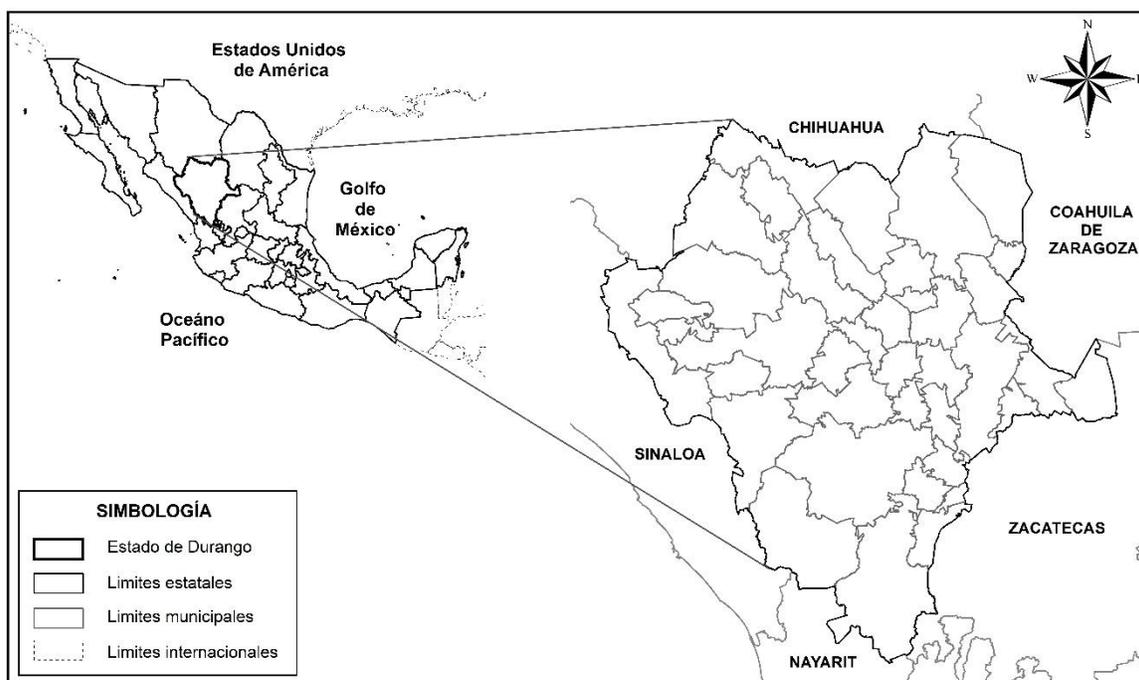


Figura 4.1. Ubicación del estado de Durango

En el Estado se presentan cuatro provincias fisiográficas, entre las cuales destacan serranías y las mesetas. La de mayor extensión es la Provincia Sierra Madre Occidental, la cual ocupa la porción central y occidental de la entidad; las Llanuras del Norte, desplegadas en la zona Noreste, y la Mesa del Centro, que se localiza en la parte centro-oriental. Cada una de ellas ha llegado a subdividirse en subprovincias con características de relieve más particulares y distintivas (SEMARNAT, 2009b).

De acuerdo a la la clasificación mundial de tipos de clima, del alemán Wladimir Kóppen (1936), modificada por Enriqueta García (INEGI, 2005), por su localización geográfica, Durango presenta climas semisecos templados, secos, muy secos,

semifríos, semicálidos y cálidos (figura 4.2). El clima semiseco templado ocupa la mayor extensión (26% de la superficie Estatal) y se distribuye en forma de franja que cruza la entidad del Noroeste al Este-Sureste. Su temperatura media anual varía de 12 a 18°C y su precipitación total anual oscila de 400 a 600 mm.

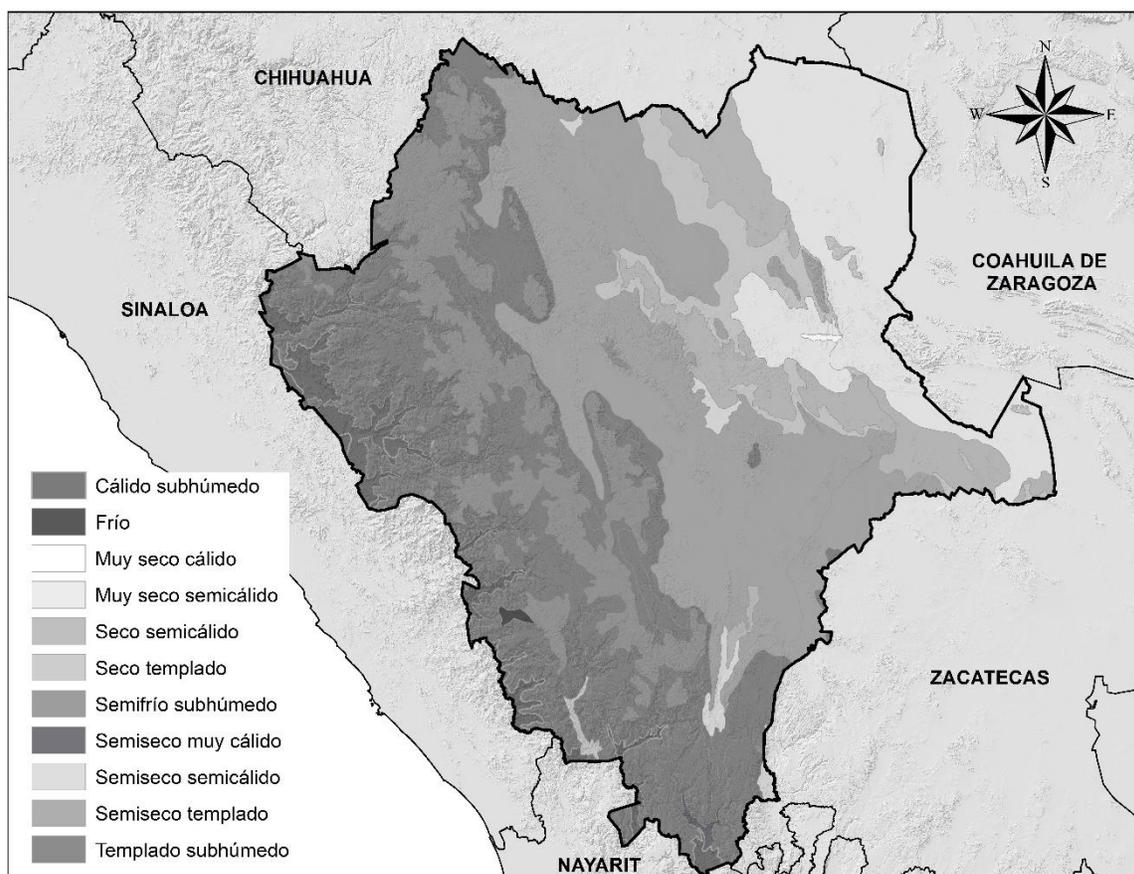


Figura 4.2. Distribución climática en el estado de Durango

En la parte Occidental y Sur del Estado, el clima se clasifica como templado subhúmedo (22% del territorio estatal) en donde la temperatura media anual varía entre 12 y 18°C y la precipitación total anual de 600 a 1,500 mm.

En la Región Lagunera y del Bolsón de Mapimí predomina el clima muy seco semicálido (13% del territorio estatal) con temperaturas medias anuales entre 18 y 22°C, con precipitaciones muy bajas entre 100 y 300 mm.

En las porciones más elevadas de la zona serrana se presentan clima semifrío subhúmedo (12% del territorio estatal) aun cuando es posible encontrar intercaladas

zonas de clima templado subhúmedo, sobre todo en sitios donde se localizan grandes cañadas.

El 27% restante se conforma de climas de tipo semicálido: 8% semicálido subhúmedo con lluvias en verano; 8% seco templado; 4.5% cálido subhúmedo con lluvias en verano; 4% semiseco semicálido; 1.5% semiseco muy cálido, y cálido 0.4%. El resto corresponde a mínimas porciones de clima semifrío húmedo con abundantes lluvias en verano, clima muy seco, muy cálido y cálido, y muy seco templado.

A nivel nacional, Durango se ha distinguido por presentar temperaturas extremas en el invierno. Esta situación es particular de sitios como La Rosilla, Guanaceví, donde se registra la temperatura mínima récord (2005) con 28.5°C bajo cero, y Santa Bárbara, Durango, localidades enclavadas en la Sierra Madre occidental y en donde se presentan inviernos largos y fríos, nevadas frecuentes y presencia de heladas desde septiembre hasta junio.

La precipitación del Estado de Durango se distribuye en dos periodos de lluvia, el de alta precipitación, de junio a octubre, con 416 mm, y estiaje, de noviembre a mayo, con 89 mm. La precipitación media anual es de 505 mm.

Se presenta una distribución de isoyetas de Suroeste a Noroeste en orden decreciente, siendo la mayor de 1,200 mm y la de menor de 200 mm, esta última ubicada en el límite con el estado de Coahuila (figura 4.3). De esta forma, existe una región de láminas de lluvia promedio de 1,200 mm que se localiza en la vertiente del Pacífico, región que corre de Noroeste a Suroeste, considerándose la zona con mayores precipitaciones de la entidad y que coincide con las zonas de bosque y selva de Durango.

La causa principal que permite que esta parte del Estado presente este rango de lluvia se encuentra en el factor orográfico que representa la Sierra Madre Occidental; la cual, al recibir la humedad del Pacífico, y al condensar por enfriamiento al ascender, se conforman los eventos más importantes de lluvia para esta zona.

Solo una pequeña parte de la humedad del Pacífico logra traspasar la barrera orográfica hacia la vertiente interior de Durango, principalmente en la zona de pastizales, matorral y agricultura. En estas zonas la precipitación media es de

600 mm anuales, y estos son cada vez menores, conforme se adentra a la parte oriental, donde la precipitación media es de 200 mm al año, sobre todo en el corredor que conforma la Región Lagunera hasta el municipio de San Juan de Guadalupe, en donde se presentan los climas semiseco, seco y muy seco.

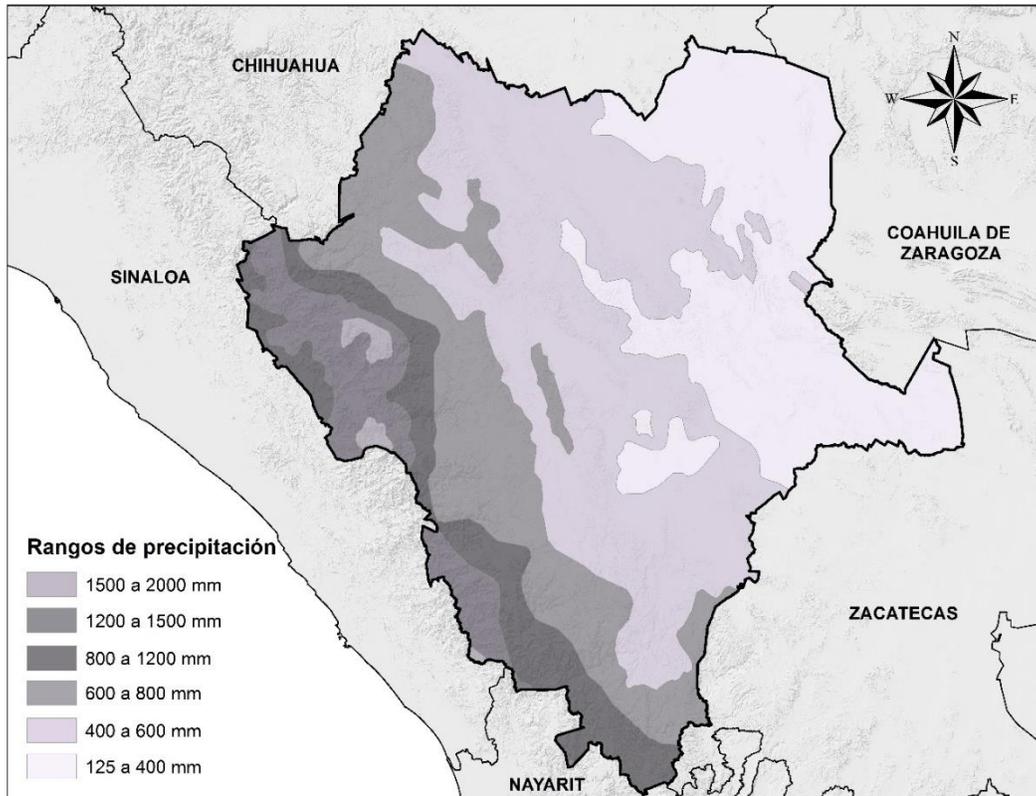


Figura 4.3. Distribución pluvial promedio anual en el estado de Durango

4.2 Materiales

4.2.1 Base de datos climatológica

En México el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) provee de información meteorológica, que se actualiza por los Organismos de Cuenca y Direcciones Locales de la CONAGUA, que asciende a aproximadamente 55 millones de registros diarios de lluvia en 24 horas y temperatura mínima y máxima, reportados por alrededor de 5,500 estaciones climatológicas (CONAGUA, 2018).

Para los casos que cuenten con registros mayores de 10 años, se realiza el cálculo de normales climatológicas, valores extremos y estadísticas mensuales. La información está disponible mediante tablas, un servidor de mapas en la dirección smn.cna.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica y una aplicación para Google Earth (KMZ).

4.2.2 Información geográfica digital

Para el procesamiento de información geoespacial del estado, se utilizó información vectorial de: límites estatales y municipales, relieve, fisiográficos, climáticos, edafológicos, entre otros. Los cuales se obtuvieron de dos fuentes, que a continuación se mencionan.

Del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) que provee datos estadísticos y geográficos del país, a través del sitio <http://www.inegi.org.mx/> se realizó la descarga de datos vectoriales de áreas geoestadísticas estatales y municipales, hidrografía y unidades climáticas en formato shapefile (.shp). También se obtuvo un archivo de tipo ráster con un conjunto de datos de relieve (.bil).

Por otra parte, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) a través del sitio web <https://www.gob.mx/conabio> tiene disponibles datos vectoriales de recursos naturales. De esta fuente se obtuvieron archivos de precipitación y temperatura en formato shapefile.

4.2.3 Software

Para el análisis, procesamiento y presentación de datos de la investigación, fue necesario recurrir a diversos softwares para llevar a cabo estas tareas de la manera más rápida y eficiente que fuera posible. Algunos de estos sistemas informáticos son utilizados de manera cotidiana por la mayoría de las personas, sin embargo, algunos otros son de mayor especialización y dentro de este trabajo cumplen una función específica, por lo cual se hace una breve descripción del software que fue de trascendencia para la investigación.

R y RStudio

R es un programa de software libre y de código abierto para el análisis estadístico, con base en el lenguaje S. RStudio es un entorno de desarrollo integrado (IDE, por sus siglas en inglés) de código abierto gratuito. Es una interfaz que se instala

después de R y está organizada para el mejor manejo y generación de gráficos, tablas de datos o códigos R (Kent State University, 2018). Se utilizó como base para la instalación del paquete SPEI.

Paquete SPEI (R)

Es un conjunto de funciones para calcular la evapotranspiración potencial y varios índices de sequía ampliamente utilizados (Begueria, Serrano & Sawasawa, 2013), incluidos el índice de precipitación estandarizado (SPI) y el índice de precipitación-evapotranspiración (SPEI).

ArcMap

Es una aplicación que se utiliza para crear, editar, explorar y mostrar conjuntos de datos de información geográfica. Se representa como una colección de capas y otros elementos de un mapa (ArcGIS 10.5 Help, 2016). Cuenta con un amplio conjunto de herramientas para realizar análisis espaciales y administrar datos de información geográfica de forma automatizada (ESRI, 2016).

Complemento de Excel para detección de cambios de régimen

El software está diseñado para detectar automáticamente cambios estadísticamente significativos en el nivel medio y la magnitud de las fluctuaciones en las series de tiempo. El algoritmo de cálculo procede del método secuencial para detectar cambios en el régimen propuesto por Rodionov (2004) y que se describió en el apartado 3.5. Está escrito originalmente en Visual Basic para Aplicación (VBA) para el entorno de Excel 2002 (Rodionov, 2006), pero funciona en versiones posteriores. La herramienta se encuentra disponible para descargar gratuita en el sitio web <https://www.beringclimate.noaa.gov/regimes/>.

4.3 Métodos

4.3.1 Selección de estaciones climatológicas y periodo de estudio

Se seleccionó el periodo de estudio con los siguientes criterios: que fuera el más actual, que incluyeran la mayor cantidad de datos posibles y contara con al menos 30 años de datos (Wilhite & Glantz, 1985).

Se obtuvo el porcentaje de datos faltantes en cada estación CNA-SMN, al contar los días que no se tuviera registro del valor observado y dividiendo entre los días totales del periodo. Lo cual debió cumplir la segunda condición de selección, que el porcentaje de datos faltantes fuera menor o igual al 10% del total. En estaciones necesarias para el análisis espacial se toleró hasta un 25% de datos perdidos.

4.3.2 Control de calidad de datos climáticos

Una vez que se eligieron las estaciones, se realizó un control básico de calidad de datos climáticos que consistió en identificar valores no razonables de acuerdo con los siguientes criterios:

- Cantidades de precipitación diaria menores que cero.
- Temperatura máxima diaria menor que la temperatura mínima diaria.

Se eliminaron los valores no razonables para posteriormente completar con la estimación de datos faltantes.

4.3.3 Cálculo de datos faltantes en las series climatológicas

Para cualquier estudio climático siempre es imprescindible contar con series de datos climáticos completas, por lo que es necesario rellenar las series para los días o meses que hace falta información. Existen diversos métodos con los que se pueden estimar estos datos, se seleccionaron dos para el área de estudio.

Uno de los métodos más estudiados y utilizados en diversas investigaciones climáticas e hidrológicas es del U. S. National Weather Service (NWS), conocido también como el cuadrado de la distancia inversa, es un método sencillo de utilizar, pero se debe contar con información de estaciones cercanas. Puede ser aplicado a datos diarios, mensuales o anuales (Campos, 1998).

El National Center for Environmental Prediction (NCEP) y el National Center for Atmospheric Research (NCAR) en Estados Unidos de América desarrollaron el Climate Forecast System (CFS), que es un modelo que representa la interacción global entre los océanos, la tierra y la atmósfera (Saha et al., 2010). Actualmente se dispone de un análisis secundario del CFS (Climate Forecast System Reanalysis - CFSR) para un periodo de 35 años (1979-2014) de datos diarios para las variables

de temperatura, precipitación, viento, humedad relativa y energía solar. La resolución del CFSR es aproximadamente 38 km (Saha et al., 2014).

A continuación, se presenta la forma en que se estimaron los datos faltantes con estos métodos.

4.3.3.1 *Método U.S. NWS*

Considera que la influencia de la lluvia en una estación para el cálculo de la misma en cualquier otro punto, es inversamente proporcional a la distancia entre los dos puntos (Chow, Maidment & Mays, 1994). En investigaciones recientes se verificó que es uno de los mejores métodos para estimar datos faltantes en estaciones climatológicas en México (Gallegos, Arteaga, Vázquez & Juárez, 2016; Gamboa, 2015).

El método consiste en ponderar los valores observados en una cantidad W , igual al recíproco del cuadrado de la distancia D entre cada estación vecina y la estación X (Campos, 1998). El dato faltante buscado P_x , será igual a:

$$P_x = \frac{\sum P_i * W_i}{\sum W_i} \quad (14)$$

Donde:

P_i , es la precipitación observada en la estación auxiliar i , donde $i=1,2,3\dots n$, para la fecha faltante.

n , número de estaciones auxiliares (mínimo $n=2$).

$$W_i = \frac{1}{D_i^2} \quad (15)$$

D_i , es la distancia entre cada estación auxiliar y la estación incompleta, en km.

Para cada estación con datos faltantes se ubicaron las más cercanas que servirían como auxiliares y se calculó la distancia con cada una. Cuando fue posible se ubicaron las cuatro estaciones auxiliares más cercanas, una sobre cada cuadrante de los ejes coordenados Norte-Sur y Este-Oeste (Campos, 1998).

4.3.3.2 *Malla de datos del CFSR*

El sitio web: globalweather.tamu.edu, ofrece la descarga de datos diarios CFSR a través de dos opciones: (1) un mapa interactivo en el que se puede elegir el área a descargar dibujando un rectángulo sobre la superficie de interés y (2) al ingresar las coordenadas del área manualmente. Posteriormente se elige el formato en el que se desean descargar, los datos están disponibles en .txt y .csv.

Así se obtuvieron los puntos de la malla pertenecientes al Estado de Durango y los más cercanos de los Estados vecinos, para las variables de precipitación y temperatura máxima y mínima. Se completó la información de datos faltantes para cada estación con el punto de la malla CFSR más cercana a cada estación climatológica del SMN-CNA.

4.3.3.3 *Evaluación de modelos*

Se evaluó la capacidad explicativa de los modelos sobre los datos medidos en las estaciones SMN-CNA, a través de cinco índices estadísticos. La metodología de cada índice y el criterio que utilizan para determinar si el modelo es un buen estimador, se describen a continuación.

Cuadrado medio del error

A partir de las posibles muestras y para cada una su correspondiente estimación, una media global de los errores sería la desviación cuadrática media de todos ellos o, más concretamente, su esperanza matemática, que se denomina cuadrado medio del error, MSE, o desviación cuadrática media del estimador (Sánchez, *et al.*, 2006). Su cálculo se realizó con la ecuación 16.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n} \quad (16)$$

Un valor pequeño del MSE, indica que, en promedio, el estimador (x_i) no se encuentra lejos del parámetro y_i , por el contrario, si es un valor alto será indicador de que dicho estimador no se aproxima bien en promedio al valor desconocido (Sánchez Algarra, *et al.*, 2006).

Raíz cuadrada del cuadrado medio del error

Calculando la raíz cuadrada del MSE, se obtiene la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE o RMSD), que tiene las mismas unidades que la variable que se estima. Para un estimador insesgado, el RMSE es la raíz cuadrada de la varianza; conocida como la desviación estándar (Lehmann & Casella, 1998).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (17)$$

El modelo más adecuado es cuando el RMSE es muy cercano a cero, esto es, que el valor promedio de las desviaciones cuadradas se aproxime a cero y se eleva al cuadrado para que sea más riguroso el valor (Gamboa, 2015).

Error absoluto medio

Fuertes & Javier (1998) presentan la ecuación 18 para el cálculo del error absoluto medio (MAE).

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n} \quad (18)$$

Índice de Willmott

El índice de Willmott (d) se concibe como una medida descriptiva, y es tanto una medida relativa como acotada que se puede aplicar ampliamente para hacer comparaciones cruzadas entre modelos (Willmott, 1982). Se calcula de acuerdo con la ecuación 19.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^* - x_i^*)^2} \quad (19)$$

$$y_i^* = |y_i - \bar{y}| \quad (20)$$

$$x_i^* = |x_i - \bar{y}| \quad (21)$$

Si el valor de $d \geq 0.95$ es aceptado, pero debe ser lo más cercano a la unidad; se busca que el cociente de los errores elevados al cuadrado entre la suma elevada al cuadrado de las desviaciones de los valores estimados “x” y observados “y” con respecto a la media de los valores observados (\bar{y}) sea lo más próxima a cero (Cai, *et al.*, 2007).

Coefficiente de determinación

El coeficiente de correlación (R) se interpreta como una medida de la asociación entre dos variables. Esta asociación es todavía más clara si R es elevada al cuadrado (R^2), al cual se le conoce como coeficiente de determinación (Infante & Zarate, 2012).

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 * \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (22)$$

Cuando $R^2 = 1$, la asociación es perfecta, los resultados son muy buenos cuando $R^2 > 0.80$ (Ruiz Álvarez, *et al.*, 2012).

El relleno de las series de datos se realizó con el modelo más adecuado para cada estación y variable. Para decidir cuál de los dos modelos de estimación es el más adecuado para cada estación y variable climática, se tomó en cuenta que el valor del estadístico calculado fuera el más cercano al valor de referencia de cada índice estadístico. Se eligió como método de estimación aquel en el que al menos tres índices estadísticos lo señalaran como el mejor estimador.

Una vez que se obtuvieron las series de datos climáticos completas, el siguiente paso fue calcular los índices de sequía.

4.3.4 Cálculo de índices de sequía

Con la metodología descrita en el apartado 3.4., se calcularon los índices SPI y SPEI para las estaciones seleccionadas. En el caso de SPEI se inició con el cálculo del valor de PET. Los métodos disponibles para esto son Thornthwaite, Hargreaves y Penman. No se cuenta con suficiente información en las todas las estaciones climatológicas para utilizar el método de Penman, por lo que, se realizó la siguiente prueba con los otros dos métodos.

Se seleccionó un año de información de una estación que contara con los parámetros suficientes para aplicar la ecuación de Penman o en su defecto se pudieran estimar algunos, los resultados se utilizaron como referencia para comparar los valores obtenidos con Thornthwaite y Hargreaves.

Se observó que el método de Thornthwaite subestima en algunos meses y en otro sobrestima los valores de referencia, en cambio Hargreaves es más consistente y por consecuencia se seleccionó este método. Para el cálculo de Hargreaves se utilizaron datos de entrada de temperatura máxima y mínima, y datos de radiación solar, la última se estimó a partir de la latitud de la estación.

El cálculo de SPI se hizo con la metodología descrita en el apartado 3.4.1, la información de entrada que se utilizó fueron los valores de precipitación mensual en milímetros para cada estación.

Se generó un código en el paquete SPEI de R para el cálculo de PET con el método de Thornthwaite así mismo se incluyó el cálculo de los índices de sequía SPI y SPEI para escalas de 6 y 12 meses.

4.3.5 Análisis temporal y espacial

El objetivo de realizar el análisis temporal y espacial en este trabajo es para detectar etapas y regiones que fueron más afectados por la sequía durante el periodo de estudio. Con esto se realizó un análisis puntual con el método de Rodionov. La metodología que se utilizó para el análisis temporal y espacial se describe a continuación.

Para cada estación se obtuvieron frecuencias de ocurrencia de las categorías Extremadamente húmedo (ExtH), Muy húmedo (MuyH), Moderadamente húmedo (ModH), Cercano a lo normal (C normal), Moderadamente seco (ModS), Muy seco (MuyS) y Extremadamente seco (ExtS) de acuerdo con los criterios del cuadro 3.1.

Los resultados se organizaron y analizaron de tres formas:

El primer procedimiento consistió en sumar las frecuencias por categoría, obteniendo así totales para cada índice y escala (figura 4.4), con estos resultados se obtuvo una gráfica general de la frecuencia de ocurrencia de las categorías de índices de sequía.

Estaciones		Índice de sequía				Frecuencia de Categorías							
A	B	MS	MT	MU	MV	MW	MX	MY	MZ	NA	NB	NC	
1	CLAVE	NOMBRE											
53	10165	LABORATORIO DEL DESIERTO	0.5102	0.6157	0.6271	1.0335	3	21	41	224	49	13	4
54	5027	EL CUIJE	0.4968	0.781	1.0382	1.2148	10	15	29	251	32	7	11
55	5029	PRESA LA FLOR	1.1415	1.106	1.0971	1.2862	3	23	46	215	55	10	3
56	32028	JUAN ALDAMA	1.519	1.3664	1.3835	1.413	1	27	38	230	38	20	1
57	32065	CHALCHIHUITES (SMN)	0.6655	0.4305	0.4026	0.4969	4	19	43	222	49	16	2
58	5004	BAJIO DE AHUICHILA	0.6133	0.6466	0.6641	0.6624	6	15	44	229	36	24	1
59	8171	ESCALON (DGE)	0.4854	0.5823	0.6672	1.106	7	12	47	238	35	5	11
60	25041	GUATENIPA	0.6172	0.4582	0.2757	-0.031	8	14	33	234	39	27	0
61	25074	POTRERILLOS	2.4843	2.5131	2.3028	2.5522	7	14	36	246	31	13	8
62	25183	COMEDERO	0.281	0.1559	0.151	0.2843	7	21	29	239	30	24	5
63							293	1205	2308	14132	2456	1073	186

Total de Frecuencias por Índice 

Figura 4.4. Cálculo de total de frecuencias por índice de sequía

El segundo procedimiento fue con base en obtener gráficas de tiempo en las cuales se indicó el porcentaje de estaciones en las que ocurrieron las categorías de sequía (ModS, MuyS y ExtS) y C normal. De estas gráficas se identificaron periodos en que la sequía afectó un mayor porcentaje de estaciones climatológicas.

Se identificaron los periodos en los cuales los porcentajes mensuales de estaciones con alguna clase de sequía fueran mayores que el porcentaje de estaciones con la categoría de Cercano a lo normal. Para considerarlos como periodos se consideró que fueran al menos 3 meses consecutivos.

Después del reconocimiento de periodos críticos de sequía con el análisis temporal, se complementó el estudio con un análisis espacial. Que permitió la visualización de la continuidad y la variabilidad de los valores de sequía en la superficie del Estado, a través del uso de herramientas de interpolación (Childs, 2011).

La interpolación fue con base en el principio de autocorrelación espacial o dependencia espacial, que mide el grado de relación/dependencia entre objetos cercanos y distantes. La autocorrelación determina si hay un patrón espacial (Childs, 2011), se realizó a través de la extensión Spatial Analyst de ArcMap que ofrece varias herramientas de interpolación.

Se utilizó como herramienta de interpolación el método Kriging, que cuantifica la estructura espacial de los datos y los predice mediante la interpolación, usando estadística. Se asume que los datos más cercanos a un punto conocido tienen mayor peso o influencia sobre la interpolación, influencia que va disminuyendo conforme se aleja del punto de interés (Villatoro, *et al.*, 2008).

ArcMap crea una superficie de cuadrícula en formato ráster, a través información xyz de un conjunto de puntos. Estos puntos fueron las estaciones climatológicas con sus correspondientes coordenadas geográficas (xy) y la variable z corresponde a los valores obtenidos de los índices SPEI y SPI por mes, para las fechas que se detectaron como de mayor intensidad de sequía.

El análisis se delimitó a las fronteras del estado de Durango, a través de un archivo con las líneas vectoriales en formato .shp compatible con ArcMap.

El archivo ráster que se obtuvo de la interpolación muestra una agrupación de la variable z , que indican áreas con valores de índices de sequía dentro de rangos que se generaron automáticamente durante el proceso de interpolación. Estos rangos fueron reclasificados a los valores de categorías de sequía del cuadro 1.

De esta manera se obtuvieron mapas con áreas definidas para cada categoría de sequía (ModS, MuyS y ExtS). Y a través de estos se realizó la detección de áreas que fueron severa o recurrentemente afectadas por la sequía.

4.3.6 Comprobación de normalidad

Previo a aplicar la metodología para detectar cambios en regímenes climáticos se verificó el supuesto de normalidad. El método de Rodionov considera aplicar la prueba *t-student* como parte del procedimiento para la detección de cambios (apartado 3.5). Para utilizar el procedimiento de la prueba *t* se debe cumplir el supuesto de que los datos proceden de una distribución normal (Montgomery, 2010).

Para comparar la normalidad de los datos, es habitual el empleo de pruebas de bondad de ajuste de uso generalizado y comúnmente disponibles a través de diversos softwares. Se eligió la prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S), que es una de las pruebas más ampliamente utilizadas.

En algunos trabajos se ha demostrado una tendencia conservadora de la prueba (Shahabuddin, Ibrahim & Jemain, 2009). Para mejorarla, Lilliefors (1967) propuso una modificación (K-S-L), mediante la cual se evitan los efectos conservadores de la prueba original (Pedrosa, Juarros, Robles, Basteiro & García, 2015)

La prueba fue comparar la función de distribución teórica con la empírica y calcula un valor de discrepancia máxima entre ambas distribuciones, proporcionando un valor p . Valor que se asocia a la probabilidad de obtener una distribución que discrepe tanto como la observada si verdaderamente se hubiera obtenido una muestra aleatoria, de tamaño n , de una distribución normal (Pedrosa, *et al.*, 2015)

El valor p se compara con el nivel de significancia alfa (α), para decidir si se cumple la siguiente prueba de hipótesis:

H_0 : La muestra proviene de una distribución normal

H_1 : La muestra no proviene de una distribución normal

El criterio de decisión es el siguiente:

Si el valor $p < \alpha$ se rechaza H_0

Si el valor $p \geq \alpha$ se acepta H_0

La prueba de normalidad K-S-L se aplicó en cada estación para los resultados obtenidos del análisis de los índices de sequía, es decir, para cada estación se realizaron cuatro pruebas de normalidad: SPI 6 meses, SPI 12 mese, SPEI 6 meses y SPEI 12 meses.

Para la aplicación de la prueba se utilizó el programa estadístico R, el cual incluye un paquete con diferentes pruebas estadísticas, incluyendo K-S-L.

De acuerdo a los resultados obtenidos de esta prueba se seleccionaron aquellas estaciones que cumplieran el supuesto de normalidad y para los índices se eligió la escala que contara con el mayor número de estaciones con el cumplimiento de la prueba de normalidad.

4.3.7 Prueba t de Rodionov para detectar cambios de régimen

Se realizó la detección de cambios mediante el complemento de Excel descrito en el apartado 4.2.3. El programa utilizó como datos de entrada la serie temporal de los índices obtenidos en cada estación y los parámetros de la prueba.

Los parámetros de longitud de corte y el nivel de significancia controlan la magnitud y la escala de los regímenes que fueron detectados. Diferentes combinaciones en estos parámetros tienen un efecto directo sobre el valor de RSI, es decir que para

cada diferente par de estos valores se obtendrán diferentes interpretaciones de los resultados. De esta manera, se analizó el caso de una longitud de corte igual a 5 para un nivel de significancia de 0.05 (figura 4.5).

El programa también requiere el parámetro de peso de Huber que controla la participación de los valores atípicos. Debido a estos valores, el promedio no es representativo del valor medio de los regímenes, y esto puede afectar significativamente los resultados de la detección de cambio de régimen, el peso para el valor de los datos se debe elegir de modo que sea pequeño si ese valor se considera como un valor atípico (Rodionov, 2006). Se utilizó un valor de 2, para el parámetro de peso de Huber.

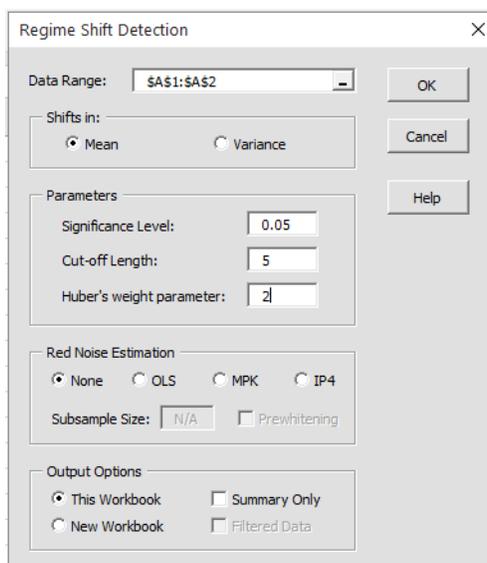


Figura 4.5. Parámetros usados en la prueba de detección de cambios de régimen

Para cada serie de tiempo, el programa calculó el índice de cambio de régimen (RSI), el valor medio de los regímenes con pesos iguales y desiguales, la duración del régimen, los niveles de confianza final para los cambios y los pesos de los valores atípicos. Esta información para cada variable se colocó en una hoja de trabajo separada junto con los gráficos correspondientes (Rodionov, 2006).

Se analizaron los resultados obtenidos mediante gráficas, en las que se incluyen los valores de los índices, media de los regímenes con pesos iguales y el valor de RSI donde se identificaron cambios. Las gráficas se generaron de forma individual para cada una de las estaciones seleccionadas.

La detección de cambios en la varianza se realizó de la misma forma que para la media. Los parámetros del programa fueron los mismos, la única diferencia es que en este caso no se usa la función de peso de Huber. De esta forma, el programa calculó el índice de cambio de régimen de varianza (RSSI), el valor medio de los regímenes, la duración del régimen y los niveles de confianza final para los cambios.

4.3.8 Detección de cambios en la media y varianza de los índices de sequía y análisis de tendencias

Para cada estación se calcularon las frecuencias de ocurrencia de cambios en la media (RSI) y varianza (RSSI) de los índices de sequía, para los valores RSI se calculó únicamente la frecuencia de los valores RSI negativos, que son los que representan los regímenes de sequía.

A través de gráficas, se representaron los valores promedio obtenidos de media y varianza, incluyendo los valores obtenidos de los índices de sequía. En la misma gráfica se incluyeron los valores de RSI y RSSI. Ya que estas gráficas se obtuvieron de manera individual por cada estación meteorológica y por índice de sequía, se seleccionaron algunas para describirlas; la selección se hizo de acuerdo a áreas que presentaron mayor frecuencia de ocurrencia de valores de cambio RSI y RSSI.

Estas áreas se identificaron de acuerdo al análisis espacial de las frecuencias obtenidas de los valores RSI y RSSI, a través de la metodología de interpolación descrita en el apartado 4.3.5.

Para el análisis de tendencias, las frecuencias de ocurrencia de cambios en la media y varianza se agruparon en periodos de cinco y diez años. Se identificó si durante estos periodos se presentó una tendencia de disminución o incremento de cambios.

5 RESULTADOS

5.1 Información climatológica

El periodo de estudio, con base en los criterios descritos en el apartado 4.3.1., es el más actual y engloba una mayor cantidad de datos, este periodo es de 1979 a 2008. Dentro de este periodo se localizaron dos estaciones con registro climático mensual completo. De acuerdo con los criterios de datos faltantes, se identificaron 43 estaciones para temperatura máxima y mínima y 44 para precipitación que tienen un faltante menor al 10%. Se seleccionaron estaciones adicionales, que cumplen con el límite de 25% de datos faltantes, 16 para temperatura máxima y mínima y 15 para precipitación (figura 5.1).

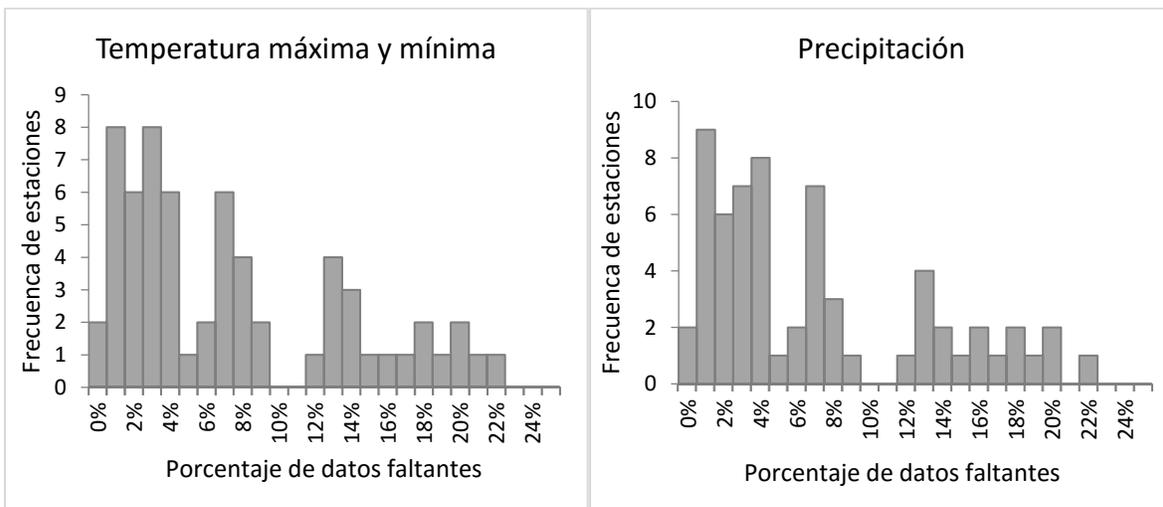


Figura 5.1. Histograma de frecuencia de estaciones para datos faltantes

En total se seleccionaron 61 estaciones SMN-CNA, de las cuales 52 pertenecen al Estado de Durango, tres a Coahuila, tres a Sinaloa, dos al Estado de Zacatecas y una a Chihuahua (figura 5.2).

Las características generales de las estaciones (clave, nombre, coordenadas y altitud) se presentan en el cuadro 5.1, de igual forma se incluyen los puntos de la malla CFSR más cercano a cada una de las estaciones.

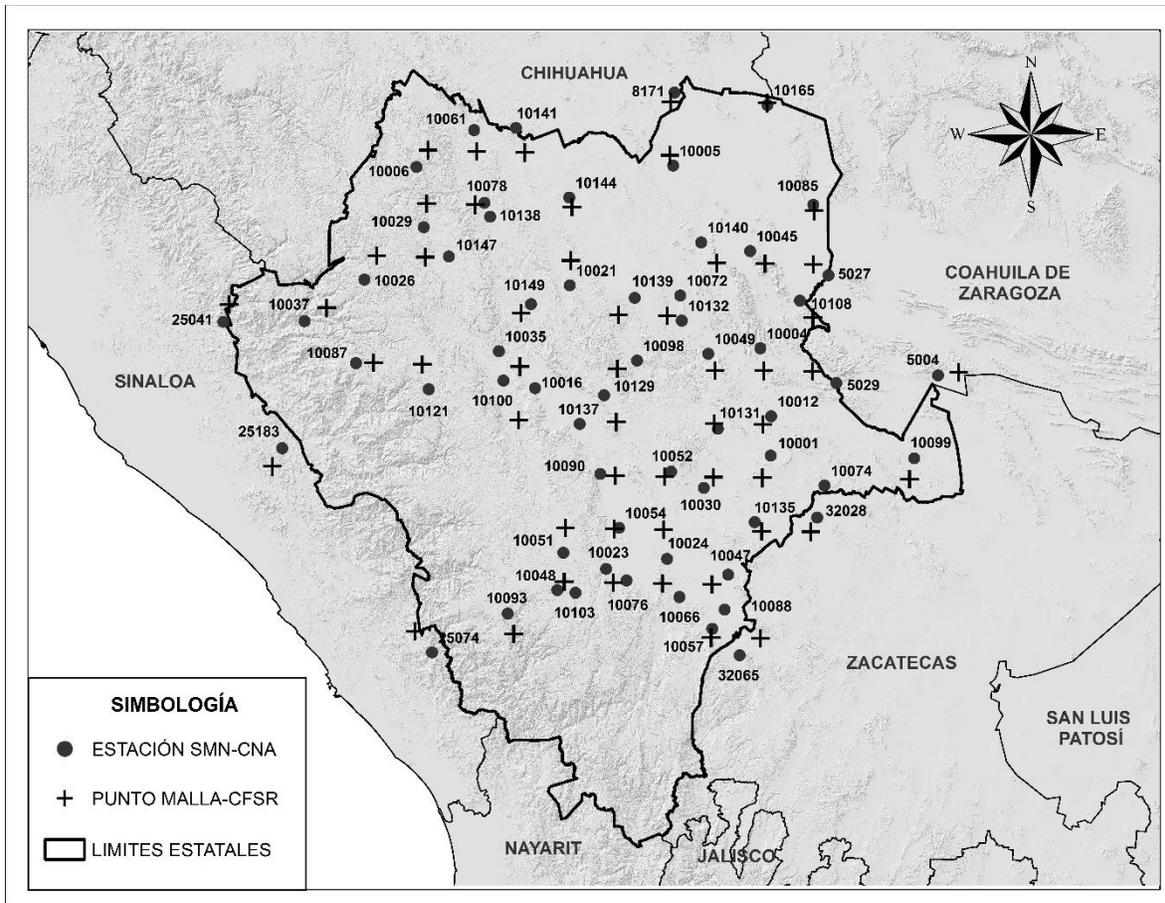


Figura 5.2. Estaciones meteorológicas CNA-SMN seleccionadas

Cuadro 5.1. Características generales de las estaciones CNA-SMN seleccionadas

Clave	Nombre	X	Y	Altitud	Punto Malla CFSR
10001	ATOTONILCO	-103.698333	24.640556	1950	245-1038
10004	CAÑÓN FERNÁNDEZ	-103.773611	25.265278	1200	251-1038
10005	CEBALLOS	-104.351111	26.323889	1188	264-1044
10006	CENDRADILLAS	-106.010556	26.282778	2270	264-1059
10012	CUENCAMÉ	-103.698333	24.869444	1600	248-1038
10016	CHINACATÉS	-105.211667	25.010000	2050	251-1053
10021	EL PALMITO	-105.003611	25.614444	1538	258-1050
10023	EL PUEBLITO	-104.735000	23.964444	1900	239-1047
10024	EL SALTITO	-104.349444	24.028611	1847	242-1044
10026	EL TARAHUMAR	-106.324444	25.616944	2534	258-1063
10029	GUANACEVÍ (SMN)	-105.951667	25.933056	2099	261-1059
10030	GUADALUPE VICTORIA (DGE)	-104.122222	24.446111	2000	245-1041
10035	J. SALOMÉ ACOSTA	-105.448889	25.220556	1670	251-1053

Clave	Nombre	X	Y	Altitud	Punto Malla CFSR
10037	LA HUERTA	-106.700556	25.363333	670	254-1066
10045	MAPIMÍ	-103.846667	25.832222	1388	258-1038
10047	NARCISO MENDOZA	-103.960000	23.942222	2063	239-1041
10048	NAVÍOS VIEJOS	-105.041667	23.834444	2581	239-1050
10049	NAZAS	-104.106667	25.230000	1250	251-1041
10051	OTINAPA	-105.008611	24.053611	2400	242-1050
10052	PÁNUCO DE CORONADO	-104.333056	24.538333	2134	245-1044
10054	PEÑA DEL ÁGUILA	-104.658056	24.205278	1890	242-1047
10057	PRESA SANTA ELENA	-104.055556	23.625278	1913	236-1041
10061	ROSARIO	-105.644167	26.506111	1800	264-1056
10066	SAN JOSÉ DE ACEVEDO	-104.266389	23.807222	1750	239-1044
10072	SAN PEDRO DEL GALLO (SMN)	-104.291667	25.567222	1700	254-1044
10074	SANTA CLARA	-103.353056	24.469167	1800	254-1034
10076	SANTIAGO BAYACORA	-104.604444	23.898889	1900	239-1047
10078	SARDINAS	-105.565833	26.084167	1639	261-1056
10085	TLAHUALILO	-103.442778	26.106389	1100	261-1034
10087	VASCOGIL	-106.362500	25.129167	2400	251-1063
10088	VICENTE GUERRERO	-103.979722	23.737778	1950	239-1041
10090	CANATLÁN (DGE)	-104.783333	24.518056	2000	245-1047
10093	EL SALTO (DGE)	-105.352778	23.690278	2538	236-1053
10098	RODEO (DGE)	-104.562500	25.183333	1346	251-1047
10099	SAN JUAN DE GUADALUPE (DGE)	-102.782778	24.631389	1531	245-1028
10100	SANTIAGO PAPASQUIARO (SMN)	-105.415278	25.050000	1740	251-1053
10103	SANTA BARBARA (DGE)	-104.926111	23.821667	2260	239-1050
10108	CIUDAD LERDO (DGE)	-103.521944	25.546111	1140	254-1034
10121	LOS ALTARES	-105.891667	24.988889	2490	251-1059
10129	CONETO DE COMONFORT	-104.768889	24.976944	1950	248-1047
10131	PEÑÓN BLANCO (DGE)	-104.037778	24.793056	1700	248-1041
10132	SAN LUIS DEL CORDERO (DGE)	-104.280000	25.420000	1500	254-1044
10135	CUAUHTÉMOC	-103.795556	24.251389	2175	242-1038
10137	GUATIMAPÉ (DGE)	-104.921944	24.806944	1974	248-1053
10138	SAN BERNARDO	-105.526667	26.004444	1640	261-1056
10139	AGUA PUERCA	-104.583889	25.548333	1410	254-1047
10140	LA CADENA	-104.162500	25.878611	1500	258-1041
10141	CANUTILLO	-105.373333	26.525556	1700	264-1053
10144	EL MIRADOR	-105.018333	26.126667	1880	261-1050
10147	EL ZAPE	-105.785833	25.766667	1940	258-1059
10149	GENERAL ESCOBEDO	-105.250000	25.500000	1580	254-1053
10165	LABORATORIO DEL DESIERTO	-103.746944	26.685556	1160	267-1038
5027	EL CUIJE	-103.340278	25.696667	1120	258-1034

Clave	Nombre	X	Y	Altitud	Punto Malla CFSR
5029	PRESA LA FLOR	-103.283889	25.068056	1300	251-1034
32028	JUAN ALDAMA	-103.397778	24.281667	1999	242-1034
32065	CHALCHIHUITES (SMN)	-103.880000	23.471944	2313	236-1038
5004	BAJÍO DE AHUICHILA	-102.632222	25.116111	1300	251-1025
8171	ESCALÓN (DGE)	-104.350000	26.750000	1263	267-1044
25041	GUATENIPA	-107.220833	25.343056	512	254-1072
25074	POTRERILLOS	-105.825833	23.453611	1572	236-1059
25183	COMEDERO	-106.816667	24.618056	310	245-1069

5.2 Estimación de datos faltantes en las series climáticas

Una vez seleccionadas las series climáticas a utilizar, se realizó la evaluación de los métodos del cuadrado de la distancia inversa y de la malla CFSR, con los índices estadísticos seleccionados. El cálculo de los índices estadísticos, así como la elección del método para estimar los datos perdidos, se hizo de acuerdo con la metodología descrita en el apartado 4.3.3.3.

Se completaron los datos faltantes para cada una de las estaciones analizadas, con el método que se evaluó como mejor estimador para cada variable. De esta manera, se obtuvieron 61 series climáticas mensuales completas para el área de estudio.

De acuerdo a los resultados obtenidos de la evaluación de modelos de estimación de datos faltantes, la Malla CFSR es un buen método para estimar temperatura máxima. En 34 estaciones resultó ser el mejor estimador de datos perdidos en comparación con las 25 que se completaron con el Método US NWS. Sin embargo, para precipitación fue el mejor únicamente en dos estaciones, para temperatura mínima se evaluó como mejor en 18 de las 59 estaciones (figura 5.3).

Estos resultados indican que el método a utilizar para completar datos faltantes es dependiente de la variable que se requiera estimar. La precipitación es una de las variables más difíciles de estimar, debido a que no presenta una tendencia específica, particularmente en datos diarios. A nivel mensual se podría encontrar alguna tendencia, sin embargo, será siempre dependiente de las condiciones locales de estudio, por lo que el mejor método para estimar datos faltantes será aquel que involucre el uso de registros cercanos al área de estudio.

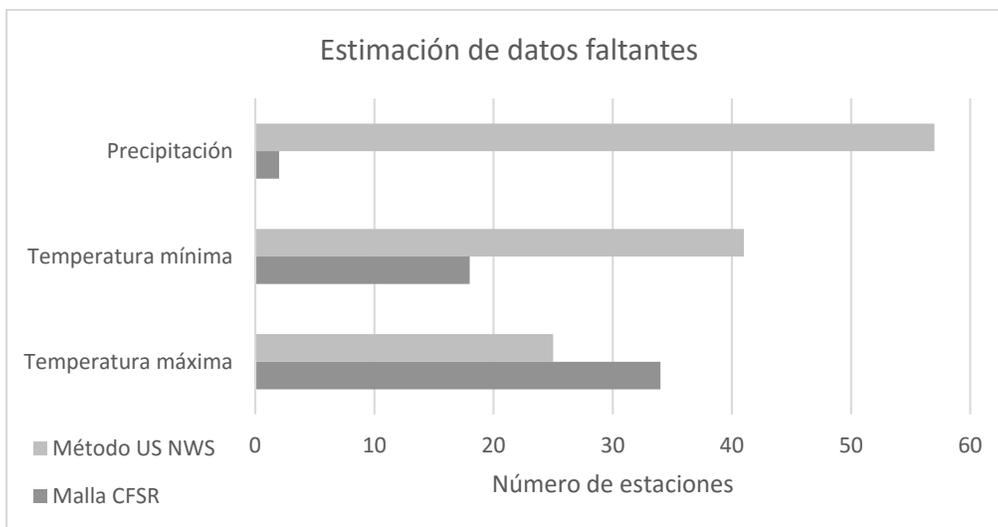


Figura 5.3. Método utilizado para estimar datos faltantes por elemento climático

Los resultados de los índices estadísticos que se utilizaron para la evaluación de los modelos en cada estación y variable se presentan en el anexo 1.

5.3 Índices de sequía

En la figura 5.4 se presenta el código que se generó en R para la obtención de los índices SPEI y SPI, se muestra un ejemplo para la estación 10001 Atotonilco. Se describen las instrucciones que se usaron para generar los cálculos de los índices.

Los resultados obtenidos del cálculo de índices de sequía se muestran en una sola tabla (figura 5.5), estos incluyen los valores calculados de PET y el balance en el caso del índice SPEI.

```

RStudio
File Edit Code View Plots Session Build Debug Profile Tools Help
Go to file/function Addins

Source
Console Terminal x

> #Lectura de datos a partir de un archivo .csv preparado previamente con los datos climáticos de la estación correspondiente#
> E10001 <- read.csv("C:/ESTACIONES_DGO_M/10001/10001.csv", header = TRUE, sep = ",")
> #Cálculo de evapotranspiración (PET) con el método de Hargreaves, el resultado se agrega a una nueva columna (PET_HR) de la tabla cargada originalmente#
> E10001$PET_HR <- SPEI::hargreaves(E10001$TMIN,E10001$TMAX,lat=24.64055555555554)
> #Cálculo del balance utilizado por el índice SPEI, es la diferencia entre la precipitación (PRCP) y PET, se almacena en la columna BAL#
> E10001$BAL <- E10001$PRCP-E10001$PET_HR
> #Cálculo de los índices SPEI y SPI, el balance es la entrada para SPEI y la precipitación para SPI. Al final se indica la escala de cálculo para cada índice (6 y 12 meses)#
> spei6_10001 <- SPEI::spei(E10001[, 'BAL'], 6)
> spei12_10001 <- SPEI::spei(E10001[, 'BAL'], 12)
> spi_6_10001 <- SPEI::spi(E10001[, 'PRCP'], 6)
> spi_12_10001 <- SPEI::spi(E10001[, 'PRCP'], 12)
> #Almacenamiento de resultados de cálculo SPEI y SPI en nuevas columnas de la misma tabla, para cada escala obtenida#
> E10001$SPEI6 <- spei6_10001 [["fitted"]]
> E10001$SPEI12 <- spei12_10001 [["fitted"]]
> E10001$SPI6 <- spi_6_10001 [["fitted"]]
> E10001$SPI12 <- spi_12_10001 [["fitted"]]
> #Exportar tabla con resultados obtenidos a un nuevo archivo .csv para cada estación#
> write.csv(E10001, 'C:/ESTACIONES_DGO_M/10001/E10001.csv')

```

Figura 5.4. Código en RStudio para el cálculo de índices de sequía

	AÑO	MES	PRCP	TMAX	TMIN	TMED	PET_HR	BAL	SPEI6	SPEI12	SPI6	SPI12
1	1979	1	219.5	11.9	-4.3	3.8	60.71330	158.786699	NA	NA	NA	NA
2	1979	2	58.5	14.7	-4.0	5.4	75.15298	-16.652978	NA	NA	NA	NA
3	1979	3	2.0	18.1	-2.8	7.7	113.40804	-111.408036	NA	NA	NA	NA
4	1979	4	4.0	21.3	-2.2	9.6	140.87879	-136.878791	NA	NA	NA	NA
5	1979	5	6.0	23.4	0.6	12.0	165.09081	-159.090812	NA	NA	NA	NA
6	1979	6	87.4	25.0	5.4	15.2	166.50189	-79.101888	1.23017135	NA	1.184438783	NA
7	1979	7	154.0	25.3	8.9	17.1	164.41781	-10.417805	-0.27760841	NA	-0.526787838	NA
8	1979	8	193.8	23.2	8.5	15.9	143.14831	50.651688	-0.37247167	NA	-0.577736619	NA
9	1979	9	23.6	23.0	6.0	14.5	129.56000	-105.960000	-1.23685349	NA	-1.109225022	NA
10	1979	10	0.0	24.4	-1.0	11.7	127.31985	-127.319850	-1.70815446	NA	-1.294811089	NA
11	1979	11	0.0	17.8	-6.3	5.8	80.98896	-80.988957	-1.68425324	NA	-1.396343046	NA
12	1979	12	60.8	14.9	-3.5	5.7	66.62608	-5.826084	-1.21488663	-0.08296182	-1.049182756	-0.16798901
13	1980	1	21.0	14.7	-6.8	4.0	70.42893	-49.428928	-0.95997605	-0.99358255	-0.895804817	-1.00106382
14	1980	2	30.4	16.5	-4.3	6.1	81.82838	-51.428382	-1.19841498	-1.10910628	-1.307552826	-1.10043626

Figura 5.5. Resultados del cálculo de índices de sequía con RStudio para la estación 10121 Los Altares

Para los índices de escala de 6 meses el primer valor se obtuvo para el mes de junio de 1979 y para la escala de 12 meses el valor inicial de sequía fue en enero de 1980. Es decir, que para los índices de 6 meses se obtuvieron 355 datos y 349 para los índices de 12 meses para cada estación.

Se obtuvieron las estadísticas: media, desviación estándar, mínimo y máximo de los índices calculados, para cada estación. Se realizó con la finalidad de obtener un resumen de los cálculos de los índices de sequía. Los resultados se muestran en los cuadros 5.2 y 5.3.

Cuadro 5.2. Estadísticas generales del índice SPEI por estación meteorológica

Clave Estación	SPEI 6 meses				SPEI 12 meses			
	Media	Máximo	Mínimo	Desviación Estándar	Media	Máximo	Mínimo	Desviación Estándar
10001	0.004	0.979	-2.316	2.579	0.000	0.978	-2.064	2.404
10004	0.014	0.974	-2.007	2.068	0.012	0.976	-2.257	2.206
10005	0.008	0.981	-2.820	2.361	0.008	0.982	-2.693	2.433
10006	0.007	0.978	-1.891	2.097	0.006	0.976	-2.136	2.085
10012	0.002	0.977	-2.232	1.955	0.003	0.979	-2.153	2.172
10016	0.011	0.980	-1.894	1.960	0.008	0.981	-1.581	1.904
10021	0.006	0.978	-2.257	2.241	0.003	0.978	-2.323	2.039
10023	0.002	0.980	-2.254	2.887	-0.005	0.983	-2.105	2.785
10024	0.003	0.976	-2.134	2.615	0.003	0.975	-1.988	2.286
10026	0.012	0.975	-2.054	2.477	0.012	0.976	-2.059	2.260
10029	0.016	0.980	-2.742	2.136	0.019	0.984	-2.272	2.277
10030	0.014	0.981	-2.162	2.243	0.013	0.977	-1.931	2.027
10035	0.007	0.980	-3.120	2.379	0.002	0.979	-2.465	2.251
10037	0.007	0.976	-2.312	2.656	0.009	0.977	-1.912	2.307
10045	0.008	0.983	-2.390	2.703	0.003	0.977	-2.017	1.991
10047	0.008	0.976	-1.939	2.163	0.005	0.980	-2.242	2.114
10048	0.014	0.989	-3.108	2.121	0.010	0.981	-2.600	2.269
10049	0.006	0.977	-2.295	1.981	0.003	0.977	-1.993	1.957
10051	0.005	0.978	-2.355	2.339	-0.001	0.980	-2.087	2.214
10052	0.009	0.983	-2.832	2.224	0.006	0.977	-1.956	2.206
10054	0.013	0.976	-1.999	2.268	0.006	0.976	-2.000	2.063
10057	0.011	0.980	-2.506	2.166	0.007	0.978	-2.081	2.176
10061	0.005	0.981	-2.250	1.997	0.005	0.980	-2.278	2.245
10066	0.011	0.983	-2.508	2.169	0.006	0.977	-2.315	2.030
10072	0.011	0.976	-1.894	2.366	0.011	0.975	-1.968	2.147
10074	0.009	0.978	-2.096	2.053	0.006	0.977	-2.079	2.203
10076	0.006	0.981	-2.558	2.631	-0.001	0.979	-2.220	2.251
10078	0.003	0.979	-2.799	2.318	0.000	0.976	-1.958	2.253
10085	0.011	0.981	-2.526	2.123	0.010	0.978	-2.320	1.996
10087	0.013	0.979	-2.104	2.093	0.012	0.978	-2.216	1.900
10088	0.013	0.977	-2.018	2.076	0.013	0.979	-2.167	2.173
10090	0.004	0.980	-2.121	2.219	0.002	0.978	-1.903	2.091

Clave Estación	SPEI 6 meses				SPEI 12 meses			
	Media	Máximo	Mínimo	Desviación Estándar	Media	Máximo	Mínimo	Desviación Estándar
10093	0.015	0.977	-2.186	2.026	0.016	0.974	-1.919	2.012
10098	0.007	0.978	-1.938	2.125	0.003	0.976	-2.024	2.112
10099	0.010	0.981	-2.445	2.029	0.004	0.975	-2.116	2.132
10100	0.010	0.977	-2.423	2.491	0.005	0.979	-2.464	2.099
10103	0.007	0.978	-2.114	2.140	0.003	0.977	-2.101	2.138
10108	0.011	0.977	-1.978	2.130	0.005	0.976	-1.969	2.093
10121	0.027	0.975	-2.565	2.521	0.008	0.982	-2.565	2.529
10129	0.005	0.979	-2.064	2.277	0.001	0.976	-2.127	2.246
10131	0.004	0.976	-1.993	2.110	-0.005	0.978	-2.076	1.873
10132	0.011	0.980	-2.283	2.299	0.007	0.976	-1.723	2.273
10135	0.009	0.987	-3.097	2.349	0.011	0.977	-2.086	2.078
10137	-0.010	0.981	-1.958	2.328	-0.016	0.977	-1.954	1.941
10138	0.007	0.979	-1.935	2.157	0.008	0.978	-2.202	2.102
10139	0.013	0.976	-2.135	2.235	0.016	0.978	-1.898	1.963
10140	0.007	0.981	-2.164	1.997	0.000	0.977	-1.752	2.004
10141	0.009	0.977	-2.094	2.352	0.010	0.975	-1.933	2.302
10144	0.005	0.977	-2.561	2.374	0.002	0.978	-2.311	2.283
10147	0.010	0.979	-2.250	2.226	0.006	0.975	-2.102	2.401
10149	0.008	0.979	-2.128	2.024	0.006	0.984	-2.415	2.106
10165	0.004	0.979	-2.159	2.101	0.002	0.979	-2.454	2.208
5027	0.002	0.981	-2.902	2.492	-0.001	0.982	-2.643	2.501
5029	0.012	0.978	-2.230	2.321	0.010	0.975	-2.097	2.099
32028	0.008	0.978	-2.163	2.179	0.011	0.979	-2.320	2.142
32065	0.009	0.983	-2.134	2.112	0.004	0.980	-1.767	1.901
5004	0.006	0.978	-2.052	2.289	0.003	0.978	-2.128	2.111
8171	0.007	0.988	-3.193	2.236	0.011	0.981	-2.430	2.240
25041	0.006	0.979	-1.974	2.822	0.004	0.977	-2.156	2.249
25074	0.002	0.987	-2.913	2.552	-0.002	0.977	-2.444	1.946
25183	0.011	0.979	-2.279	2.405	0.011	0.986	-3.031	2.053

Cuadro 5.3. Estadísticas generales del índice SPI por estación meteorológica

Clave Estación	SPEI 6 meses				SPEI 12 meses			
	Media	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar	Media	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar
10001	0.005	1.003	-3.460	3.120	0.000	1.011	-3.716	2.213
10004	0.003	0.991	-2.647	2.277	0.009	0.963	-2.442	2.335
10005	0.022	0.950	-2.355	2.266	0.019	0.939	-2.444	2.460
10006	0.010	0.967	-2.741	2.139	0.007	0.962	-2.363	2.439
10012	0.008	0.991	-3.169	2.360	0.006	0.973	-2.491	2.427

Clave Estación	SPEI 6 meses				SPEI 12 meses			
	Media	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar	Media	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar
10016	0.013	0.978	-2.339	2.019	0.009	0.978	-2.036	1.857
10021	0.013	0.967	-2.640	2.095	0.009	0.958	-1.901	2.078
10023	0.008	0.987	-2.784	2.408	0.004	0.981	-3.190	2.489
10024	-0.006	1.043	-3.555	2.450	-0.009	1.054	-3.646	2.016
10026	0.004	0.982	-3.077	2.410	0.006	0.960	-2.121	2.732
10029	0.002	0.998	-3.831	3.001	0.007	0.959	-1.869	3.155
10030	0.011	0.970	-2.828	2.463	0.008	0.960	-2.056	2.367
10035	0.006	0.982	-2.672	2.684	0.005	0.981	-3.053	2.384
10037	0.008	0.971	-2.726	2.929	0.005	0.968	-2.260	3.463
10045	0.004	1.007	-3.504	2.474	-0.001	1.012	-3.017	2.193
10047	0.007	0.984	-3.029	2.308	0.005	0.978	-2.716	2.376
10048	0.011	0.976	-3.053	2.506	0.008	0.969	-2.805	2.669
10049	-0.009	1.029	-2.819	2.059	0.008	0.972	-2.035	2.080
10051	0.006	0.996	-3.228	2.547	0.001	0.997	-3.542	2.143
10052	0.019	0.949	-2.328	2.575	0.006	0.969	-2.339	2.525
10054	0.009	0.971	-2.545	2.978	0.006	0.962	-2.773	2.403
10057	0.014	0.959	-2.500	2.090	0.010	0.949	-1.878	2.224
10061	-0.003	1.023	-4.716	2.145	0.006	0.973	-3.159	2.381
10066	0.014	0.968	-2.475	2.304	0.001	0.998	-2.809	2.718
10072	0.001	1.005	-3.807	2.542	0.005	0.978	-2.977	2.703
10074	0.012	0.974	-2.581	2.168	0.006	0.971	-2.231	2.156
10076	0.016	0.964	-2.559	2.625	0.007	0.967	-2.705	2.595
10078	0.000	1.006	-3.246	2.286	0.005	0.979	-2.362	2.259
10085	0.011	0.982	-2.703	2.362	0.005	0.980	-2.553	2.259
10087	0.007	0.971	-3.284	3.182	0.006	0.955	-2.099	2.201
10088	0.005	0.979	-2.931	2.413	0.009	0.950	-2.179	2.745
10090	0.009	0.980	-3.063	2.187	0.005	0.976	-2.652	2.074
10093	0.016	0.949	-2.436	2.216	0.008	0.950	-2.039	2.616
10098	0.016	0.959	-2.161	2.347	0.010	0.957	-2.191	2.195
10099	0.023	0.961	-2.436	2.423	-0.042	1.195	-5.946	2.104
10100	0.005	0.994	-4.037	2.648	0.003	0.985	-2.817	2.389
10103	0.010	0.971	-2.641	2.291	0.006	0.964	-2.268	2.350
10108	0.009	0.983	-2.557	2.151	0.009	0.971	-2.473	2.096
10121	0.004	0.992	-2.487	4.844	0.002	0.983	-2.103	3.645
10129	0.000	1.010	-3.116	2.495	0.002	0.993	-2.781	2.488
10131	0.010	0.971	-2.484	2.215	0.008	0.960	-2.825	2.057
10132	-0.004	1.046	-6.410	2.268	0.006	0.977	-2.636	2.431
10135	0.003	1.006	-2.989	2.922	-0.001	1.009	-2.706	2.834
10137	0.020	0.988	-2.697	2.009	-0.003	1.028	-3.559	1.950

Clave Estación	SPEI 6 meses				SPEI 12 meses			
	Media	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar	Media	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar
10138	0.008	0.973	-2.773	2.375	0.011	0.945	-1.890	2.414
10139	0.014	0.981	-5.022	2.394	-0.009	1.053	-5.428	2.123
10140	0.009	1.017	-3.267	2.000	-0.009	1.052	-3.249	1.976
10141	0.003	1.033	-3.650	2.688	-0.009	1.044	-4.104	2.828
10144	0.016	0.958	-2.577	2.269	0.011	0.956	-2.161	2.328
10147	0.003	1.013	-3.874	2.272	-0.004	1.038	-4.284	2.280
10149	0.001	1.000	-3.655	2.326	0.003	0.988	-2.918	2.429
10165	0.010	0.980	-2.726	2.434	0.007	0.969	-2.578	2.171
5027	0.040	0.929	-1.819	2.402	-0.039	1.146	-4.608	2.165
5029	0.018	0.954	-2.701	2.588	0.009	0.960	-2.152	2.680
32028	0.013	0.971	-2.999	2.238	0.011	0.950	-2.217	1.924
32065	-0.003	1.030	-3.728	2.160	0.001	1.004	-2.679	1.878
5004	0.022	0.952	-2.788	2.314	0.012	0.967	-2.677	1.994
8171	0.013	0.974	-2.637	2.344	0.008	0.976	-2.243	2.290
25041	0.005	0.982	-2.472	2.911	0.005	0.970	-2.240	2.296
25074	0.005	1.016	-3.920	2.686	-0.001	1.011	-3.361	2.257
25183	0.018	0.954	-2.265	2.437	0.004	0.976	-2.339	2.601

5.4 Análisis temporal de índices de sequía

Las frecuencias calculadas para las categorías de los índices SPI y SPEI por estación, se presentan en el anexo 2.

El comportamiento general de acuerdo con la clasificación de índices de sequía muestra que existe una tendencia hacia la distribución normal de las categorías (figura 5.6). Entre el 65 y 70% de la ocurrencia de sequía se encuentra en la categoría Cercano a lo normal, las categorías Moderadamente seco y Moderadamente húmedo se acercan a 10%. Las categorías Muy húmedo y Muy seco presentan ocurrencias de 4-5% y las categorías Extremadamente húmedo y Extremadamente seco tienen frecuencias del 1-2%.

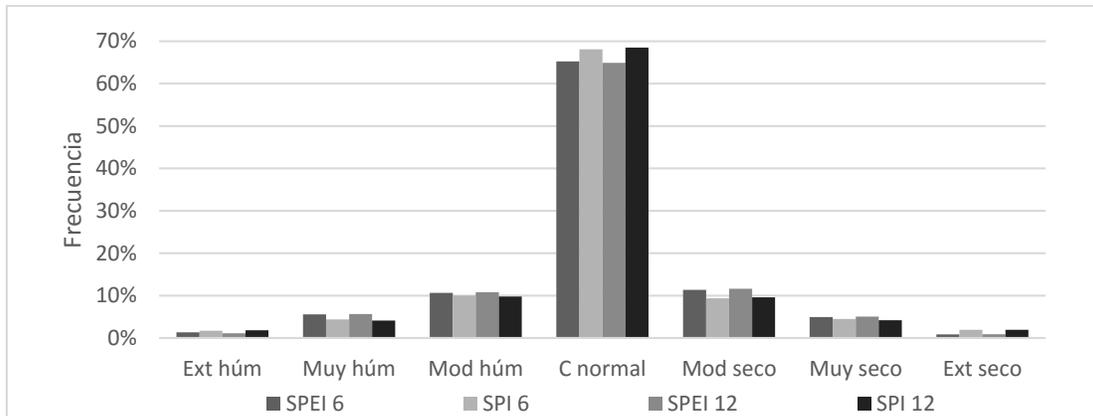


Figura 5.6. Frecuencia mensual de las categorías de los índices SPEI y SPI (1979-2008)

La tendencia de las categorías de los índices, indica que la presencia de las sequías durante el periodo de estudio es una característica normal del clima de la región, tal como lo indica Contreras (2005).

Las gráficas temporales obtenidas de acuerdo con la metodología del apartado 4.3.5, son el punto de partida para este análisis, su descripción y análisis proporcionan información fundamental para reconocer los periodos más críticos de sequías.

De esta manera, se aprecia que durante los meses dic-79, feb-80, junio y julio de 1989, abril y mayo de 1999 y ene-00 cerca del 80% de las estaciones analizadas con el índice SPEI de 6 meses presentaron algún tipo sequía. Se identificaron 10 periodos en los que el porcentaje de estaciones con algún tipo de sequía superan al número de estaciones clasificadas en C normal, el primero y más largo se presentó de oct-79 a ago-80 (figura 5.7).

Un periodo a resaltar del análisis es jun-98 a abr-00, durante el cual el porcentaje de estaciones afectadas por la sequía no fue mayor que lo normal para todos los meses. Sin embargo, es en este periodo en el que se identificaron los meses con los valores más altos, cercanos al 80% con algún tipo de sequía. En el mes de mayo-99 se tiene un porcentaje de 80.3%, el siguiente mes (junio-99) el valor es de 6.6%, durante los siguientes seis meses el valor es de alrededor del 10%, incrementa en dic-99 a 47% y alcanza el máximo de la serie (82%) en enero-00.

Los periodos de 1982 y 1989 son muy similares en cuanto a duración, magnitud de porcentaje y de igual forma los meses en los que se presentó, en 1982 el periodo

comenzó en abril y finalizó en noviembre, en 1989 el inicio se dio en febrero y terminó en septiembre.

Los resultados obtenidos con el índice SPI de 6 meses señalan una tendencia similar a la descrita para el índice SPEI de 6 meses. Los periodos identificados son los mismos que se describieron anteriormente, varían en algunos casos en el mes de inicio y de término del periodo.

Sin embargo, una notable diferencia se observa en la magnitud de los porcentajes de estaciones con algún tipo de sequía, ya que en este caso el valor mayor de la serie es 88.5% y se presentó en el mes de marzo-00, mientras que en SPEI el valor mayor fue 82% en ene-00. También es apreciable en el periodo de enero a junio de 2008, mientras que para SPEI los valores van de 40-54% en SPI se observan valores del 50-65.6% (figura 5.8).

En los índices de escala de 12 meses se pueden identificar menor cantidad de periodos de sequía, pero de mayor duración. Cinco periodos ocurrieron tanto en SPEI como SPI, estos sucedieron en los años 1979-1980, 1982, 1989, 1995-1996 y 1998-1999. Adicionalmente, para SPEI se observaron periodos en los años 1999 y 2006; y para SPI se identificó uno más en 1980 (figura 5.9).

Durante los meses junio a agosto de 1980 el porcentaje de estaciones con sequía estuvo cerca del 80% y valor máximo se presentó en octubre de 1982 con 83.6%, esto para el índice SPEI 12 meses. Para el índice SPI de la misma escala estos valores son muy similares, en junio y julio de 1980 los valores fueron de 82 y 85.2% respectivamente, siendo este último el máximo del periodo (figura 5.10). En octubre de 1982 el valor fue de 80.3%, semejante al obtenido por SPEI.

Este análisis preliminar, conduce a puntualizar que los periodos clave para detectar cambios son los siguientes.

SPEI y SPI de 6 meses: octubre de 1979 a febrero de 1980, agosto a noviembre de 1982, mayo a julio de 1998, diciembre de 1999 a mayo de 2000 y marzo a junio de 2008.

SPEI y SPI de 12 meses: mayo a agosto de 1980, julio a octubre de 1989, noviembre de 1995 a marzo de 1996 y mayo a agosto de 1998.

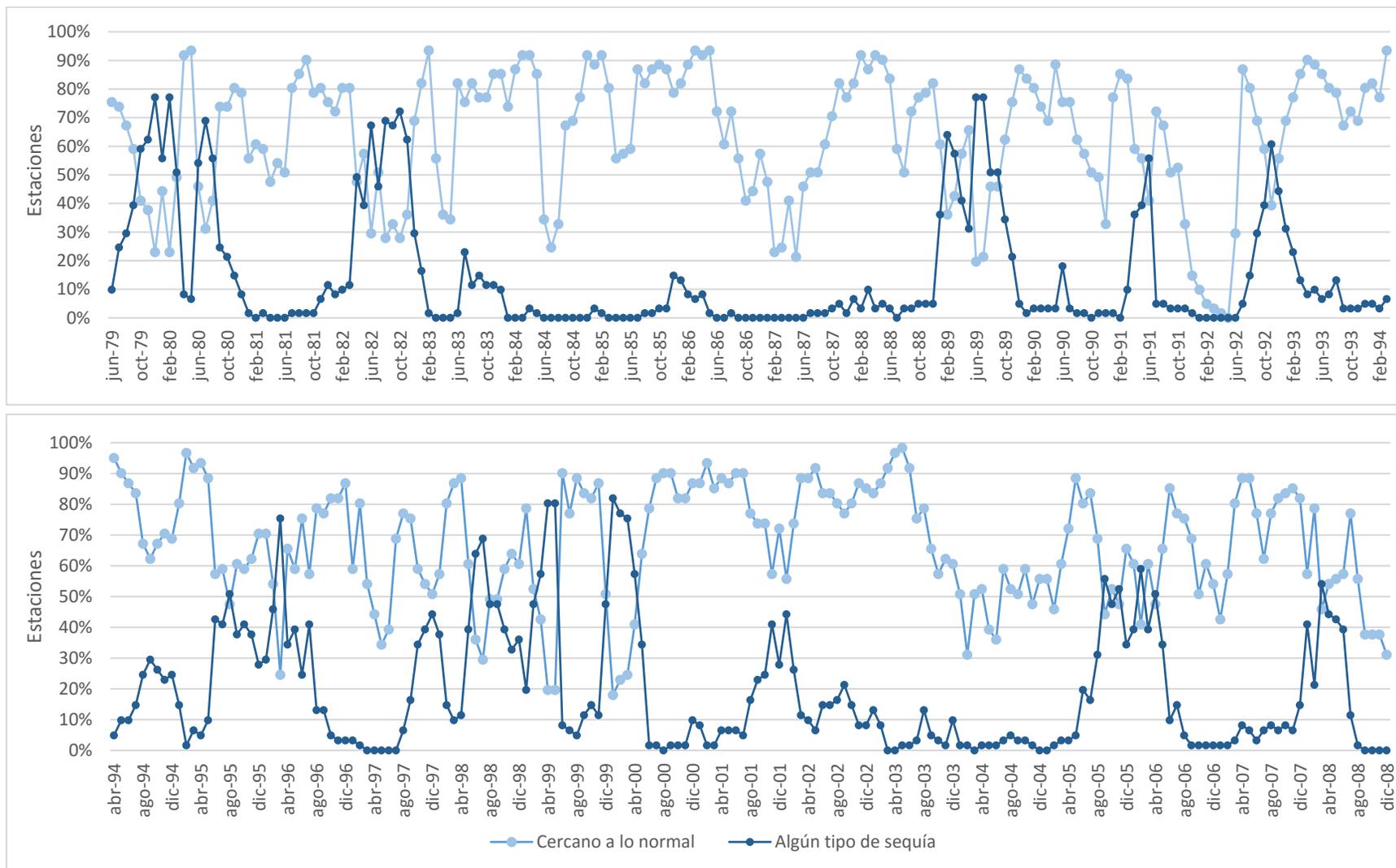


Figura 5.7. Estaciones climatológicas que presentaron algún tipo de sequía con el índice SPEI de 6 meses (1979-2008)

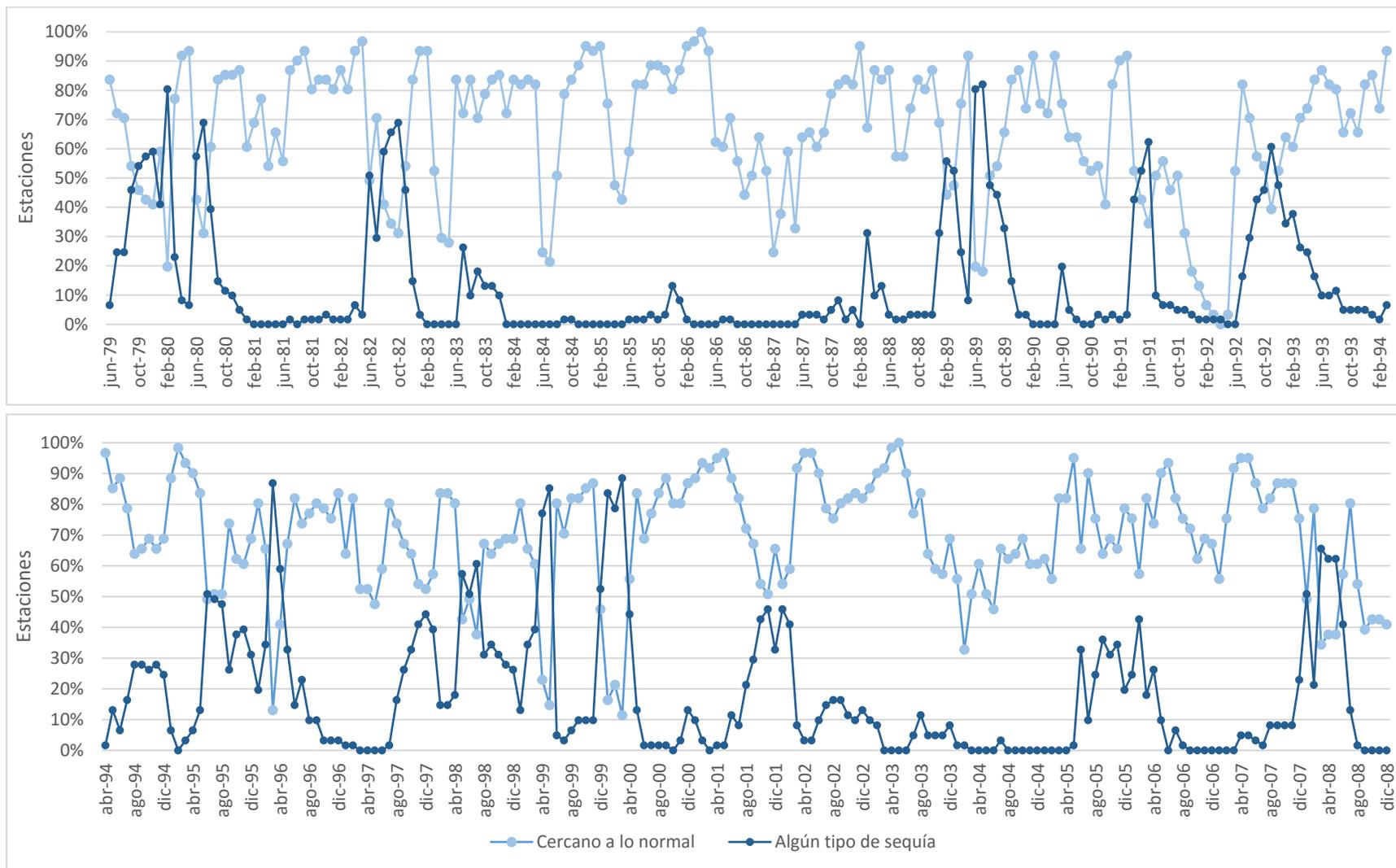


Figura 5.8. Estaciones climatológicas que presentaron algún tipo de sequía con el índice SPI de 6 meses (1979-2008)

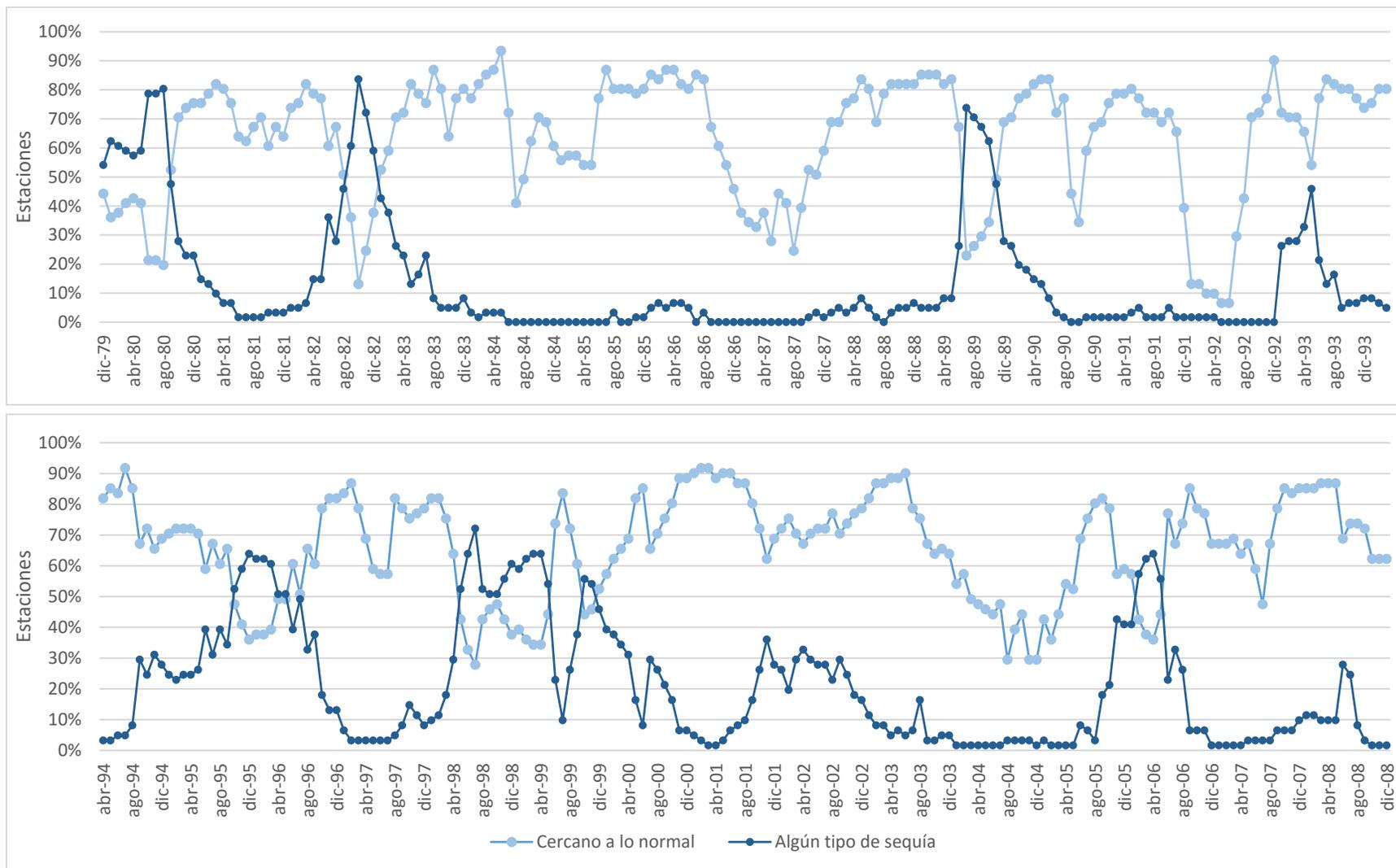


Figura 5.9. Estaciones climatológicas que presentaron algún tipo de sequía con el índice SPEI de 12 meses (1979-2008)

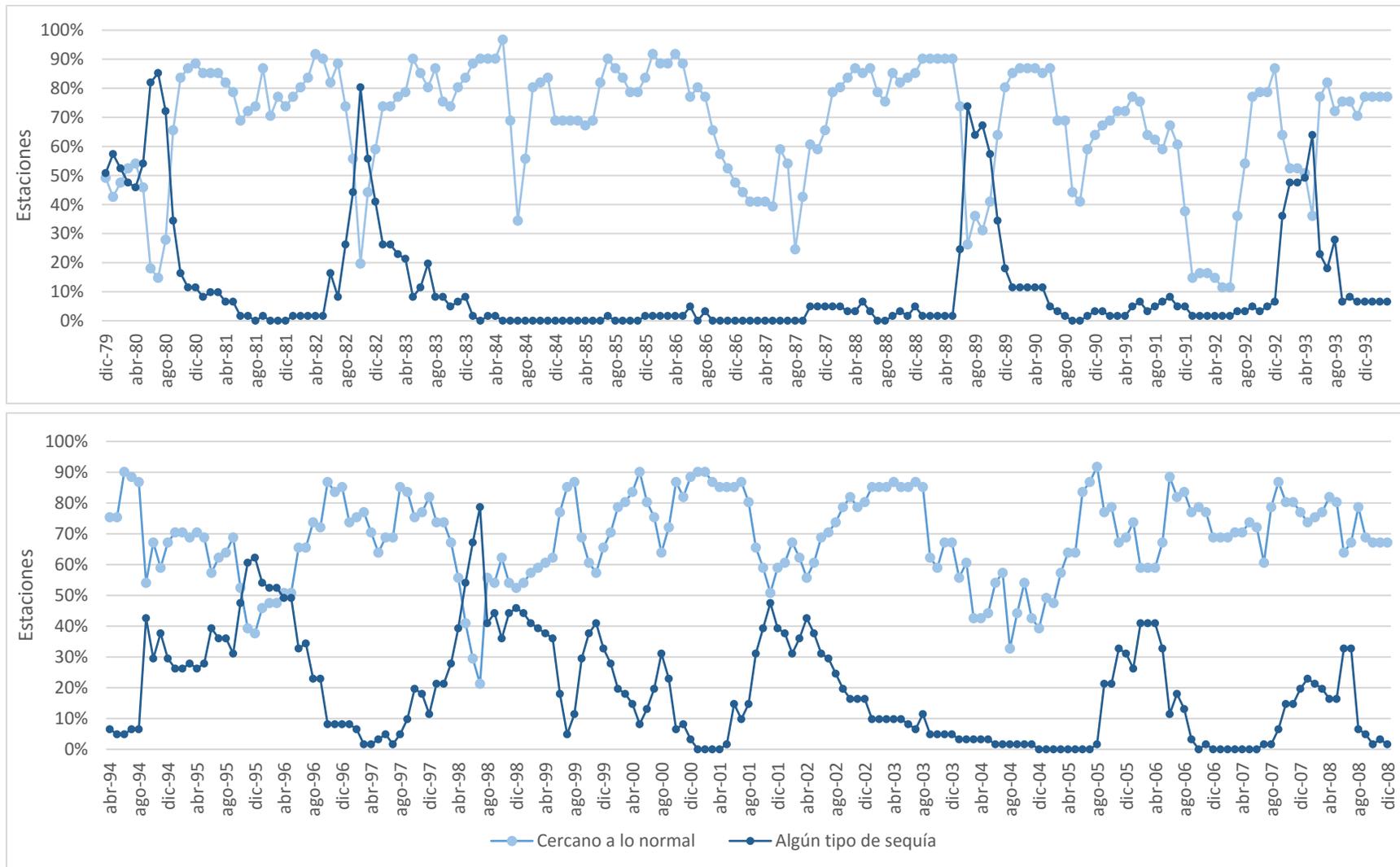


Figura 5.10. Estaciones climatológicas que presentaron algún tipo de sequía con el índice SPI de 12 meses (1979-2008)

5.5 Análisis espacial de índices de sequía

Para los índices SPEI y SPI de 6 meses se identificó un primer periodo de sequía de oct-79 a feb-80. Durante este periodo, el mes de oct-79 fue uno de los que presentó mayor intensidad de sequías, como se aprecia en la figura 5.11, la mitad del Estado presenta algún grado de sequía, las cuales se concentran en la parte occidental del mismo.

Para el índice SPEI se observa que en el norte y oriente del estado las condiciones fueron cercano a lo normal, hacia el centro y oriente se presenta la condición moderadamente seca y la región occidental fue extremadamente seca. Un comportamiento similar se presenta en el índice SPI, sin embargo, para este se presenta la condición extremadamente seca al oeste, en los límites con Sinaloa.

Este patrón espacial de sequías coincide con la distribución de precipitación en el estado, de esta manera las sequías de mayor intensidad coinciden con los lugares más lluviosos del estado, mientras que los lugares con escasa precipitación presentan condiciones normales.

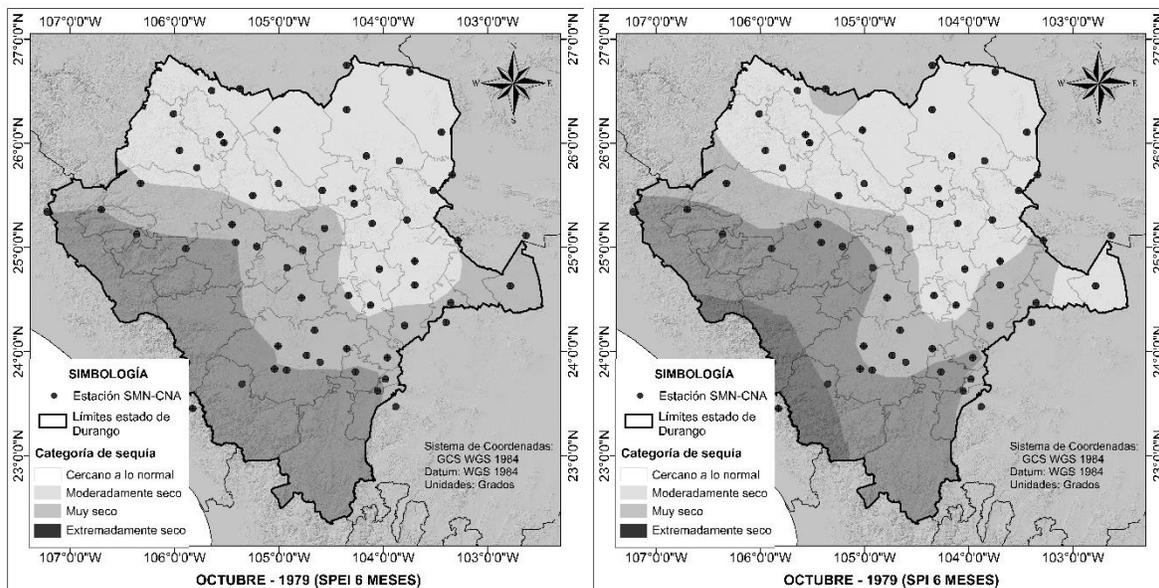


Figura 5.11. Distribución espacial de la sequía de los índices SPEI y SPI de 6 meses en Oct-79

Otro mes que se analizó en este periodo es dic-79, en el cual se observa el mismo patrón espacial que el mes descrito anteriormente (figura 5.12). Sin embargo, durante dic-79 el área afectada fue mayor con el índice SPEI, todo el Estado

presentó sequía y con SPI solo algunas áreas al norte-este del estado presentan condiciones normales. No obstante, las áreas con categorías muy seco y extremadamente seco, son significativamente menores. El índice SPEI identificó dos categorías de sequía, mientras que SPI identificó las tres categorías de sequía y condiciones normales.

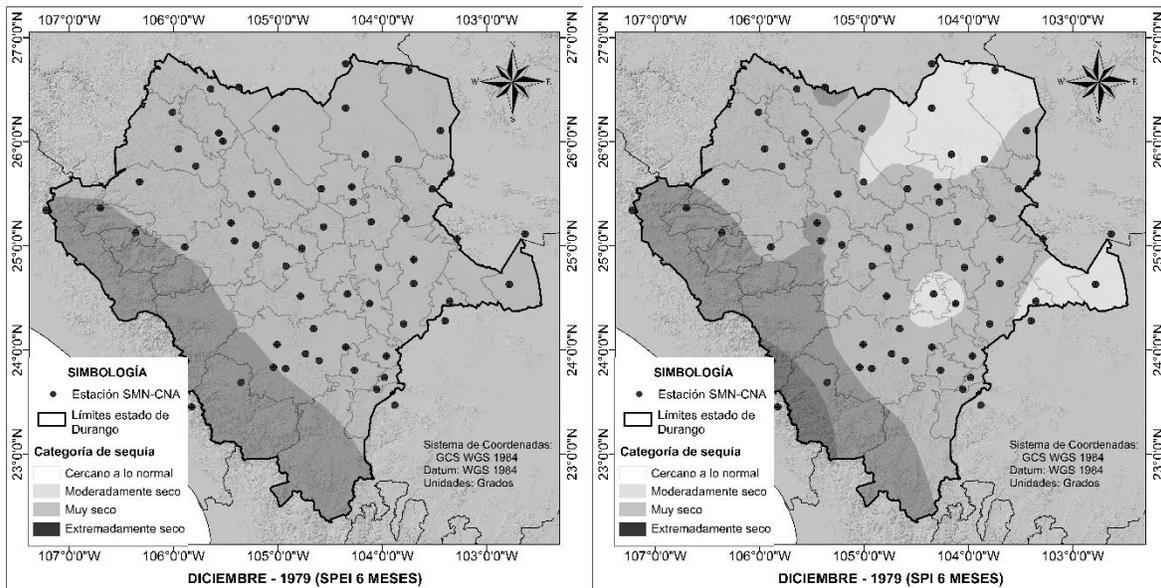


Figura 5.12. Distribución espacial de la sequía de los índices SPEI y SPI de 6 meses en Dic-79

El mes de ago-82 se identificó como el más extremo del periodo ago-82 a nov-82, las condiciones de sequía se presentan en una extensa área del Estado. En el índice SPEI se presentó un área muy seca al Sur, condiciones normales en el Norte-Oeste y Norte-Este y el resto del área Estatal con condiciones moderadamente secas. La distribución es similar para el índice SPI, aunque el área de condiciones normales es mayor que en SPEI y el área con categoría muy seco es menor, reduciéndose hacia la parte central del Estado (figura 5.13).

El mes de may-99 no se encuentra dentro de ningún periodo identificado en el análisis temporal, sin embargo, las condiciones de sequía afectaron a todo el estado. Con SPEI y SPI las áreas con condiciones normales son prácticamente nulas, identificándose en Oriente del Estado. En la figura 5.14 observa que la parte que más fue afectada es la porción Norte-Oeste, con SPEI se identificó como muy seco, con SPI un porcentaje menor de la misma área se identificó como extremadamente seco. El índice SPEI presenta otra área muy seca al sur-oeste, corresponde con el análisis de SPI, sin embargo, con este último, la condición muy

seca se extiende desde el Sur-Oeste por la región central hasta el extremo Norte-Oeste, donde se encuentran las condiciones más extremas de sequía. Para ambos índices, el área restante presenta condiciones moderadamente secas.

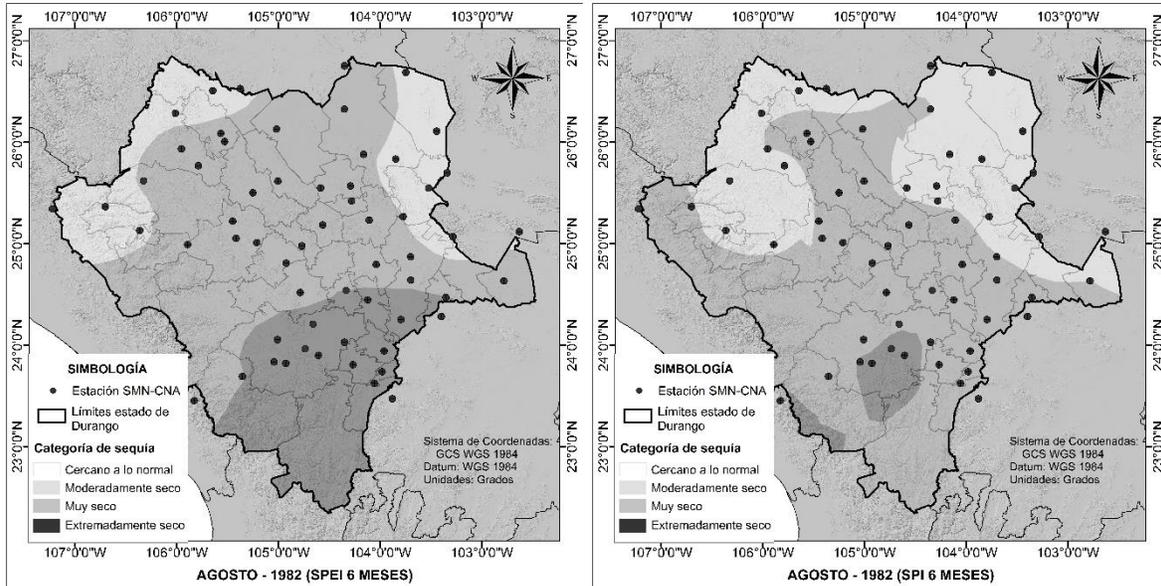


Figura 5.13. Distribución espacial de la sequía de los índices SPEI y SPI de 6 meses en Ago-82

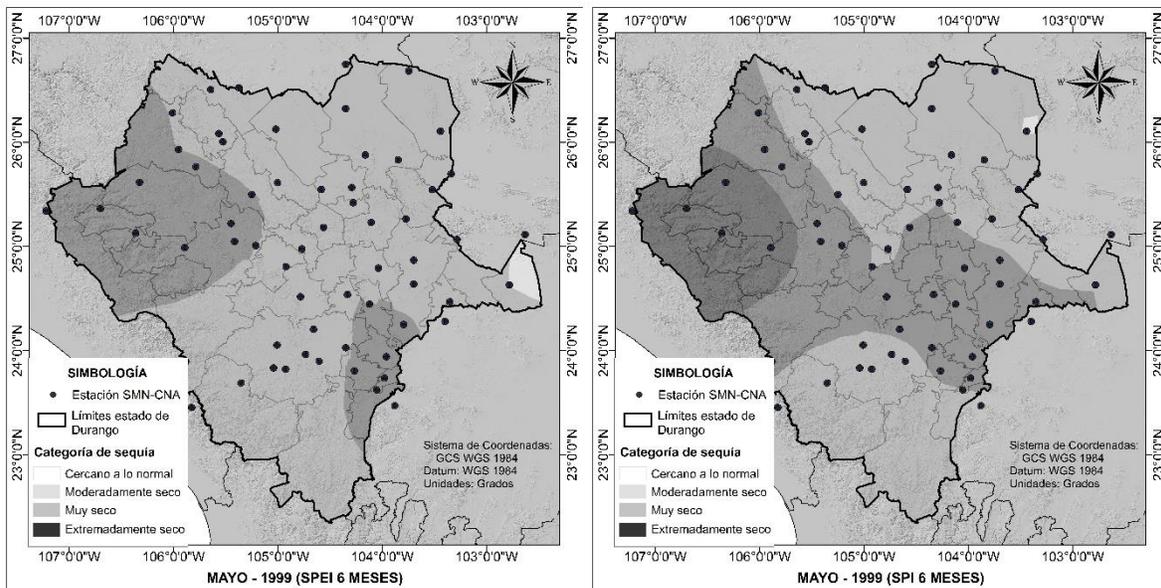


Figura 5.14. Distribución espacial de la sequía de los índices SPEI y SPI de 6 meses en May-99

El mes de enero-00 presentó el mayor porcentaje de estaciones con algún tipo de sequías durante el periodo de análisis. Los resultados obtenidos con SPEI y SPI son diferentes en el número de categorías que se obtuvieron. Con SPEI se identificó

la mayor parte del Estado en la categoría moderadamente seca y una porción al Norte como muy seca, en SPI se presentó una pequeña porción el Oeste como cercano a lo normal y otra pequeña parte al Este como extremadamente seca, en la figura 5.15 se observa que la mitad Oeste se identificó como moderadamente seca y la mitad Este como muy seca.

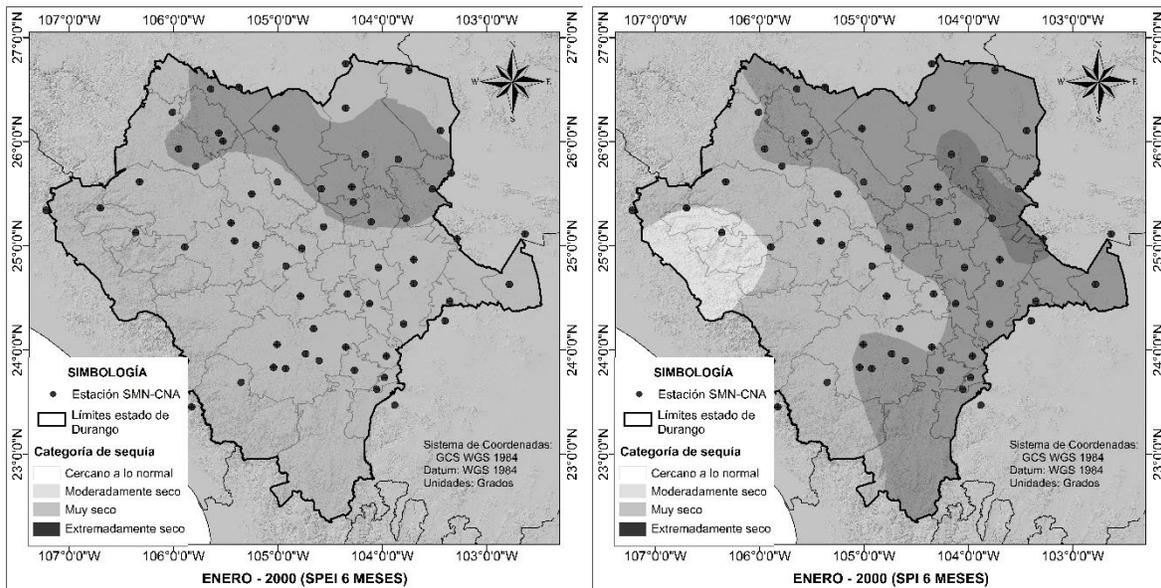


Figura 5.15. Distribución espacial de la sequía de los índices SPEI y SPI de 6 meses en Ene-00

Condiciones muy similares se presentaron en el mes de mayo-08. El índice SPEI presenta las condiciones moderadamente seca y muy seca, con distribuciones similares a las descritas en el párrafo anterior (se incrementó el área muy seca en el norte y se presentó otra porción del centro a Sur del Estado). El índice SPI la distribución es similar, sin embargo, el área afectada por sequía se reduce y se concentra en parte Oriente del Estado, en este caso las condiciones normales se encuentran en todo el Oeste y van cambiando hacia el Este, a manera de franjas verticales, en la figura 5.16 se observa un área en la región Este-Centro que se identificó como extremadamente seca.

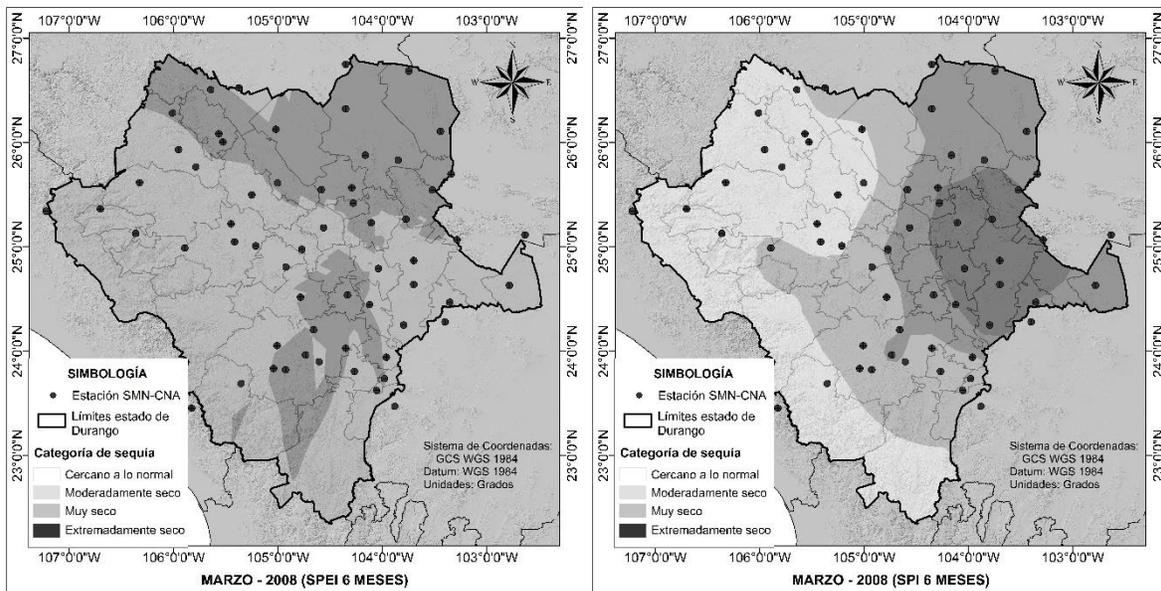


Figura 5.16. Distribución espacial de la sequía de los índices SPEI y SPI de 6 meses en May-08

En la figura 5.17 se observa que en agosto-80 las condiciones para todo el Estado fueron Moderadamente seca y Muy seca. Existe diferencia de áreas identificadas en cada índice, mientras que SPI 12 señala prácticamente todo el Estado como muy seco, SPEI 12 identificó un área menor en el Oeste del Estado y resto del estado como Moderadamente seco, SPI señala una pequeña área al este como Moderadamente seco y el área restante es Muy seca.

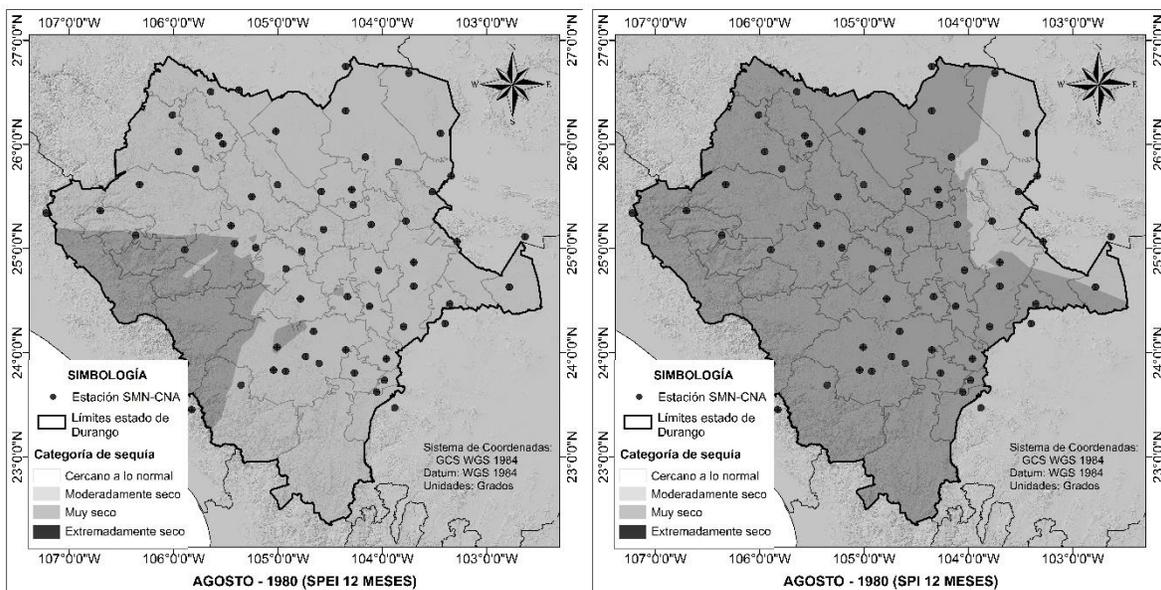


Figura 5.17. Distribución espacial de la sequía de los índices SPEI y SPI de 12 meses en Ago-80

En el mes de octubre-82 el índice SPEI 12 señala condiciones extremadamente secas en la mayor parte del Estado, excepto en el Norte que fue Muy seco. Sin embargo, el índice SPI 12 identificó como extremadamente seca solo una pequeña parte al Sur-Oeste del Estado y en el resto del área las condiciones fueron muy seco y moderadamente seco (figura 5.18).

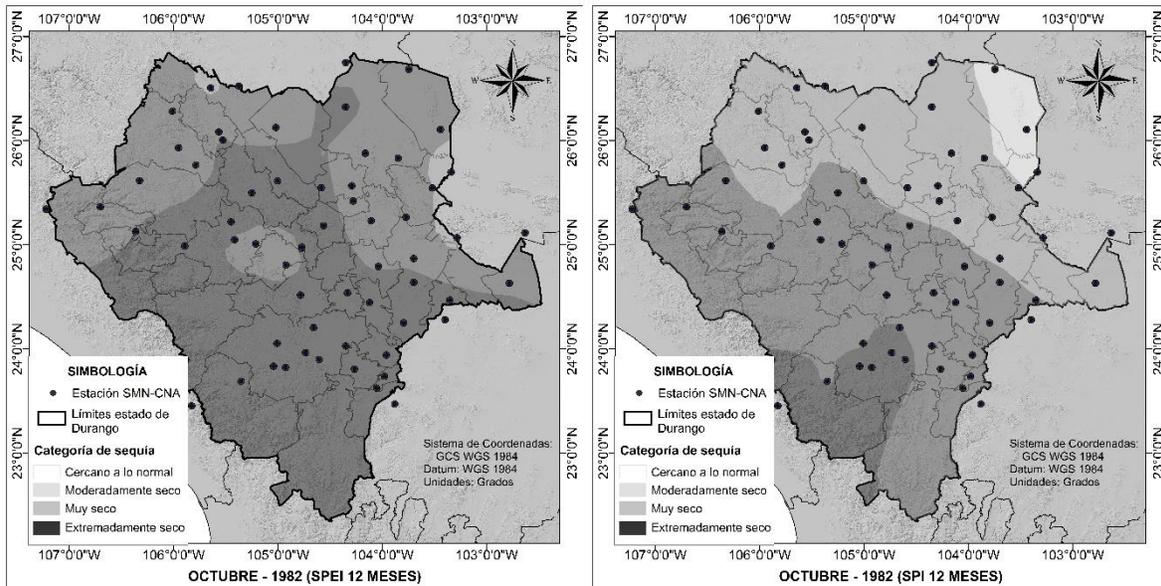


Figura 5.18. Distribución espacial de la sequía de los índices SPEI y SPI de 12 meses en Oct-82

En el mes de septiembre-89, la sequía prevaleció en todo el Estado, de acuerdo al índice SPEI 12 la condición fue Moderadamente seca. Con el índice SPI 12 se identificaron áreas con condiciones Muy secas en el centro y oriente del estado (figura 5.19).

En el mes de marzo-96, las categorías que se presentaron fueron moderadamente seca y cercana a lo normal. Existen diferencias entre las zonas señaladas por los índices SPEI y SPI, ya que en SPI las zonas de la categoría cercano a lo normal se encuentran al Norte-Este, al Centro, Centro-Este y Sur-Este, mientras que el índice SPEI señala la zona Sur del Estado como cercano a lo normal y del Centro hacia el Norte se pueden observar que las condiciones son moderadamente secas (figura 5.20).

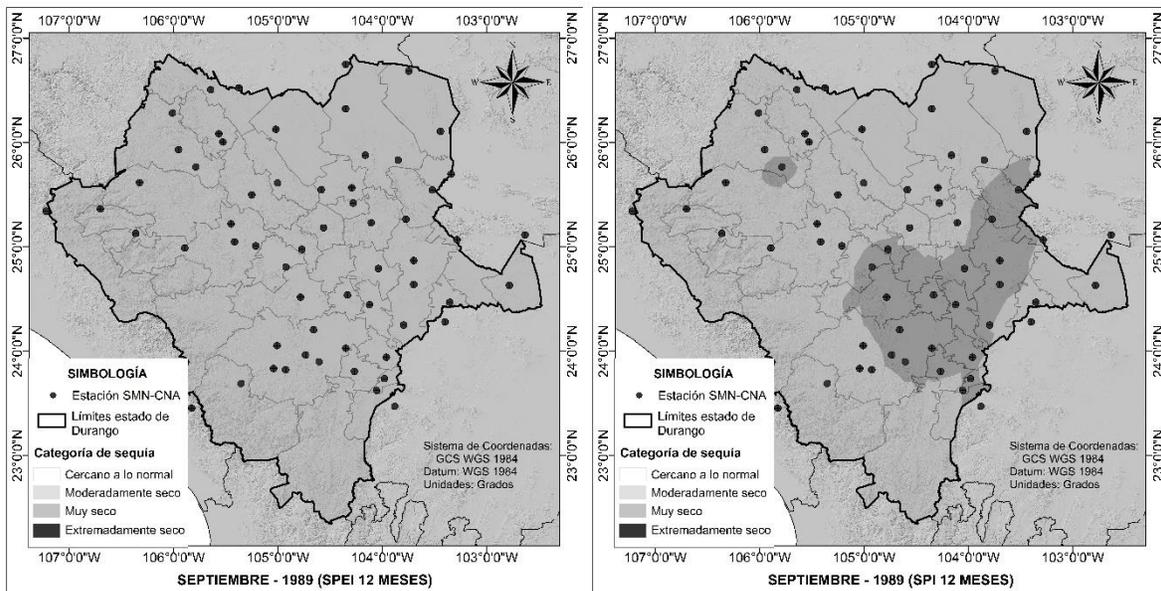


Figura 5.19. Distribución espacial de la sequía de los índices SPEI y SPI de 12 meses en Sep-89

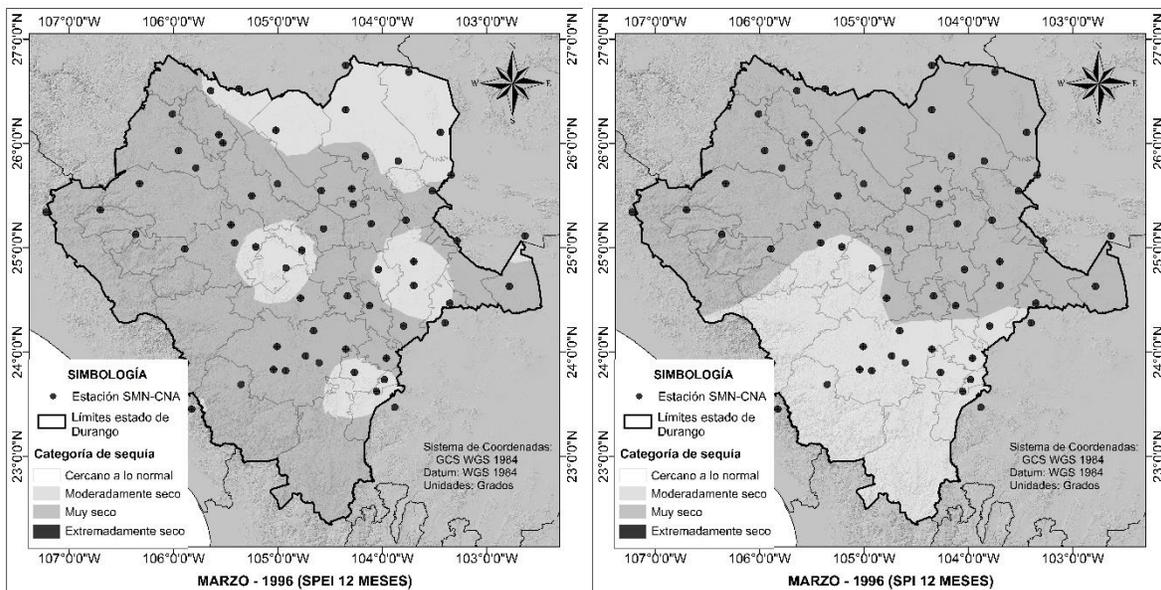


Figura 5.20. Distribución espacial de la sequía de los índices SPEI y SPI de 12 meses en Mar-96

En general, la región Oeste del Estado fue la que presentó una mayor frecuencia de sequías de las categorías Extremadamente seco y Muy seco. La categoría de sequía Muy seco afectó con más frecuencia las áreas del Norte y Noreste del Estado. En el resto del estado predominó la condición Moderadamente seca, principalmente en el Centro y Sureste del Estado, con episodios esporádicos de la categoría Muy seco.

5.6 Prueba de normalidad

Los resultados obtenidos de la prueba K-S-L se presentan en el cuadro 5.4. El nivel de significancia que se utilizó para la prueba de normalidad fue $\alpha = 0.01$. El total de estaciones que cumplen con el supuesto de normalidad es de 46 para el índice SPI de 6 meses, 45 para SPEI 6, 32 del índice SPI 12 y 31 para SPEI 12. Únicamente se aplicó el método de Rodionov para las estaciones que cumplen la condición de normalidad. Por lo cual, la detección de cambios en régimen climático se realizó para los índices SPI y SPEI de 6 meses, esto con la finalidad de incluir un área de análisis mayor.

Cuadro 5.4. Valores p obtenidos de la prueba K-S-L y resultado de la prueba de hipótesis de normalidad

CLAVE	NOMBRE ESTACIÓN	SPI6		SPI12		SPEI 6		SPEI12	
		P-Value	Decisión	P-Value	Decisión	P-Value	Decisión	P-Value	Decisión
10001	ATOTONILCO	0.4823	Se acepta Ho	0.08894	Se acepta Ho	0.4487	Se acepta Ho	0.1145	Se acepta Ho
10004	CAÑÓN FERNANDEZ	0.06171	Se acepta Ho	0.07592	Se acepta Ho	0.1362	Se acepta Ho	0.008052	Se rechaza Ho
10005	CEBALLOS	0.04259	Se acepta Ho	7.44E-07	Se rechaza Ho	0.1586	Se acepta Ho	0.09148	Se acepta Ho
10006	CENDRADILLAS	0.01567	Se acepta Ho	0.0243	Se acepta Ho	0.001083	Se rechaza Ho	0.1338	Se acepta Ho
10012	CUENCAME	0.08061	Se acepta Ho	0.1261	Se acepta Ho	0.004786	Se rechaza Ho	0.0000745	Se rechaza Ho
10016	CHINACATES	0.0243	Se acepta Ho	0.0001143	Se rechaza Ho	3.265E-07	Se rechaza Ho	3.041E-12	Se rechaza Ho
10021	EL PALMITO	0.1183	Se acepta Ho	0.00174	Se rechaza Ho	0.01286	Se acepta Ho	0.0008274	Se rechaza Ho
10023	EL PUEBLITO	0.3257	Se acepta Ho	0.2475	Se acepta Ho	0.04419	Se acepta Ho	0.01584	Se acepta Ho
10024	EL SALTITO	0.003121	Se rechaza Ho	0.0000195	Se rechaza Ho	0.1758	Se acepta Ho	0.04582	Se acepta Ho
10026	EL TARAHUMAR	0.632	Se acepta Ho	0.07266	Se acepta Ho	0.004734	Se rechaza Ho	0.2507	Se acepta Ho
10029	GUANACEVI (SMN)	0.01292	Se acepta Ho	8.201E-10	Se rechaza Ho	0.3208	Se acepta Ho	0.1652	Se acepta Ho
10030	GUADALUPE VICTORIA (DGE)	0.1384	Se acepta Ho	0.257	Se acepta Ho	0.02341	Se acepta Ho	0.000009299	Se rechaza Ho
10035	J. SALOME ACOSTA	0.5687	Se acepta Ho	0.04372	Se acepta Ho	0.07783	Se acepta Ho	0.004877	Se rechaza Ho
10037	LA HUERTA	0.4327	Se acepta Ho	0.08854	Se acepta Ho	0.1998	Se acepta Ho	0.2458	Se acepta Ho
10045	MAPIMI	0.2351	Se acepta Ho	6.697E-05	Se rechaza Ho	0.354	Se acepta Ho	0.01222	Se acepta Ho
10047	NARCISO MENDOZA	0.3416	Se acepta Ho	0.4037	Se acepta Ho	0.02149	Se acepta Ho	0.04992	Se acepta Ho
10048	NAVIOS VIEJOS	0.04852	Se acepta Ho	0.3224	Se acepta Ho	0.2505	Se acepta Ho	0.0356	Se acepta Ho
10049	NAZAS	0.000009766	Se rechaza Ho	0.03177	Se acepta Ho	0.09494	Se acepta Ho	0.00238	Se rechaza Ho
10051	OTINAPA	0.07367	Se acepta Ho	0.04685	Se acepta Ho	0.01895	Se acepta Ho	0.000004394	Se rechaza Ho
10052	PANUCO DE CORONADO	0.3255	Se acepta Ho	0.1639	Se acepta Ho	0.2613	Se acepta Ho	0.03884	Se acepta Ho
10054	PEÑA DEL AGUILA	0.02024	Se acepta Ho	0.1577	Se acepta Ho	0.02369	Se acepta Ho	0.0005065	Se rechaza Ho
10057	PRESA SANTA ELENA	0.6572	Se acepta Ho	0.02249	Se acepta Ho	0.166	Se acepta Ho	0.001375	Se rechaza Ho
10061	ROSARIO	0.01352	Se acepta Ho	0.1486	Se acepta Ho	0.0005399	Se rechaza Ho	0.00000677	Se rechaza Ho

CLAVE	NOMBRE ESTACIÓN	SPI6		SPI12		SPEI 6		SPEI12	
		P-Value	Decisión	P-Value	Decisión	P-Value	Decisión	P-Value	Decisión
10066	SAN JOSE DE ACEVEDO	0.6814	Se acepta Ho	0.02082	Se acepta Ho	0.1468	Se acepta Ho	0.05835	Se acepta Ho
10072	SAN PEDRO DEL GALLO (SMN)	0.00557	Se rechaza Ho	0.1614	Se acepta Ho	0.00000514	Se rechaza Ho	0.0004646	Se rechaza Ho
10074	SANTA CLARA	0.4452	Se acepta Ho	0.009965	Se rechaza Ho	0.1325	Se acepta Ho	0.02428	Se acepta Ho
10076	SANTIAGO BAYACORA	0.6521	Se acepta Ho	0.01849	Se acepta Ho	0.3462	Se acepta Ho	0.0005279	Se rechaza Ho
10078	SARDINAS	0.04044	Se acepta Ho	0.01563	Se acepta Ho	0.09747	Se acepta Ho	0.02803	Se acepta Ho
10085	TLAHUALILO	0.2405	Se acepta Ho	0.1416	Se acepta Ho	0.1897	Se acepta Ho	0.001158	Se rechaza Ho
10087	VASCOGIL	0.39	Se acepta Ho	0.09599	Se acepta Ho	0.06249	Se acepta Ho	0.09528	Se acepta Ho
10088	VICENTE GUERRERO	0.04379	Se acepta Ho	1.317E-07	Se rechaza Ho	0.03165	Se acepta Ho	0.00001147	Se rechaza Ho
10090	CANATLAN (DGE)	0.00207	Se rechaza Ho	2.904E-07	Se rechaza Ho	0.01179	Se acepta Ho	0.004021	Se rechaza Ho
10093	EL SALTO (DGE)	0.002129	Se rechaza Ho	0.006568	Se rechaza Ho	0.0004704	Se rechaza Ho	0.02241	Se acepta Ho
10098	RODEO (DGE)	0.0002334	Se rechaza Ho	2.682E-05	Se rechaza Ho	0.0004358	Se rechaza Ho	0.01562	Se acepta Ho
10099	SAN JUAN DE GUADALUPE (DGE)	0.1397	Se acepta Ho	1.985E-13	Se rechaza Ho	0.1224	Se acepta Ho	0.156	Se acepta Ho
10100	SANTIAGO PAPASQUIARO (SMN)	0.4137	Se acepta Ho	0.1325	Se acepta Ho	0.3331	Se acepta Ho	0.02273	Se acepta Ho
10103	SANTA BARBARA (DGE)	0.3825	Se acepta Ho	0.2224	Se acepta Ho	0.03978	Se acepta Ho	0.07969	Se acepta Ho
10108	CIUDAD LERDO (DGE)	0.08621	Se acepta Ho	0.0009411	Se rechaza Ho	0.007264	Se rechaza Ho	0.003518	Se rechaza Ho
10121	LOS ALTARES	0.00007432	Se rechaza Ho	0.001899	Se rechaza Ho		Se rechaza Ho	0.01278	Se acepta Ho
10129	CONETO DE COMONFORT	0.0007057	Se rechaza Ho	0.0003476	Se rechaza Ho	0.00001145	Se rechaza Ho	0.00007109	Se rechaza Ho
10131	PEÑON BLANCO (DGE)	0.07428	Se acepta Ho	0.01449	Se acepta Ho	0.05383	Se acepta Ho	0.00002206	Se rechaza Ho
10132	SAN LUIS DEL CORDERO (DGE)	0.1089	Se acepta Ho	0.06027	Se acepta Ho	0.006926	Se rechaza Ho	0.01388	Se acepta Ho
10135	CUAUHTEMOC	0.0379	Se acepta Ho	1.762E-05	Se rechaza Ho	0.4919	Se acepta Ho	0.5218	Se acepta Ho
10137	GUATIMAPE (DGE)	0.01049	Se acepta Ho	1.317E-07	Se rechaza Ho	0.03029	Se acepta Ho	0.004648	Se rechaza Ho

CLAVE	NOMBRE ESTACIÓN	SPI6		SPI12		SPEI 6		SPEI12	
		P-Value	Decisión	P-Value	Decisión	P-Value	Decisión	P-Value	Decisión
10138	SAN BERNARDO	0.664	Se acepta Ho	0.006766	Se rechaza Ho	0.000258	Se rechaza Ho	0.00001828	Se rechaza Ho
10139	AGUA PUERCA	0.407	Se acepta Ho	0.01631	Se acepta Ho	0.0001871	Se rechaza Ho	0.000004598	Se rechaza Ho
10140	LA CADENA	0.0008144	Se rechaza Ho	4.154E-08	Se rechaza Ho	0.01061	Se acepta Ho	0.001435	Se rechaza Ho
10141	CANUTILLO	0.08866	Se acepta Ho	1.269E-06	Se rechaza Ho	0.2235	Se acepta Ho	0.0000606	Se rechaza Ho
10144	EL MIRADOR	0.8032	Se acepta Ho	0.000001	Se rechaza Ho	0.1213	Se acepta Ho	0.1607	Se acepta Ho
10147	EL ZAPE	0.1884	Se acepta Ho	0.003837	Se rechaza Ho	0.02006	Se acepta Ho	0.1632	Se acepta Ho
10149	GENERAL ESCOBEDO	0.617	Se acepta Ho	0.001588	Se rechaza Ho	0.01418	Se acepta Ho	0.5728	Se acepta Ho
10165	LABORATORIO DEL DESIERTO	0.008181	Se rechaza Ho	0.1454	Se acepta Ho	0.02341	Se acepta Ho	0.003934	Se rechaza Ho
5027	EL CUIJE	0.1649	Se acepta Ho	8.402E-09	Se rechaza Ho	0.4982	Se acepta Ho	0.2877	Se acepta Ho
5029	PRESA LA FLOR	0.1491	Se acepta Ho	0.0173	Se acepta Ho	0.006604	Se rechaza Ho	0.009477	Se rechaza Ho
32028	JUAN ALDAMA	0.2713	Se acepta Ho	0.01197	Se acepta Ho	0.04335	Se acepta Ho	0.0008605	Se rechaza Ho
32065	CHALCHIHUITES (SMN)	0.008602	Se rechaza Ho	2.377E-08	Se rechaza Ho	0.0008043	Se rechaza Ho	0.000004522	Se rechaza Ho
5004	BAJIO DE AHUICHILA	0.1284	Se acepta Ho	0.003239	Se rechaza Ho	0.02451	Se acepta Ho	0.04851	Se acepta Ho
8171	ESCALON (DGE)	0.1756	Se acepta Ho	0.0002103	Se rechaza Ho	0.09483	Se acepta Ho	0.000233	Se rechaza Ho
25041	GUATENIPA	0.3439	Se acepta Ho	0.03434	Se acepta Ho	0.1626	Se acepta Ho	0.4281	Se acepta Ho
25074	POTRERILLOS	0.05398	Se acepta Ho	0.0004839	Se rechaza Ho	0.3015	Se acepta Ho	0.0001071	Se rechaza Ho
25183	COMEDERO	0.002249	Se rechaza Ho	2.43E-09	Se rechaza Ho	0.317	Se acepta Ho	0.3098	Se acepta Ho
Total estaciones que cumplen normalidad			49	32		45		31	
Total estaciones que no cumplen normalidad			12	29		16		30	

5.7 Detección de cambios de régimen en la media y varianza de los índices de sequía con el método de Rodionov

La prueba para la detección de cambios de régimen se realizó de acuerdo a la metodología descrita en el apartado 4.3.7, se aplicó en las estaciones que cumplieron la condición de normalidad. Un ejemplo de los resultados obtenidos con el complemento de Excel se presenta en las figuras 5.21 y 5.22 para media y varianza respectivamente.

Los resultados obtenidos para la media son: RSI que es el índice de cambio de régimen; Mean, contiene la media de los regímenes con pesos iguales; Weighed, es el valor medio de los regímenes calculados con la función de ponderación de Huber; Length, es la longitud de los regímenes; Conf, es el nivel de confianza final para los cambios y Outliers es el peso (en función de la desviación estándar) de los valores atípicos.

Para la varianza (Var), se obtuvo el índice de cambio de régimen de la varianza promedio (RSSI) y al igual que para la media se tiene la longitud del régimen y el nivel de confianza para los cambios.

	A	B	C	D	E	F	G	H
	FECHA	SPEI6	RSI	Mean	Weighed	Length	Conf	Outliers
2	jun-1979	-0.36078066	0	-0.71004018	-0.71004018	14		
3	jul-1979	-0.37194102	0	-0.71004018	-0.71004018	14		
4	ago-1979	-0.55016977	0	-0.71004018	-0.71004018	14		
5	sep-1979	-0.65670555	0	-0.71004018	-0.71004018	14		
6	oct-1979	-0.84228062	0	-0.71004018	-0.71004018	14		
7	nov-1979	-0.85567258	0	-0.71004018	-0.71004018	14		
8	dic-1979	-0.95123926	0	-0.71004018	-0.71004018	14		
9	ene-1980	-0.7968633	0	-0.71004018	-0.71004018	14		
10	feb-1980	-0.79325363	0	-0.71004018	-0.71004018	14		
11	mar-1980	-0.74357806	0	-0.71004018	-0.71004018	14		
12	abr-1980	-0.46611699	0	-0.71004018	-0.71004018	14		
13	may-1980	-0.48942521	0	-0.71004018	-0.71004018	14		
14	jun-1980	-0.91799384	0	-0.71004018	-0.71004018	14		
15	jul-1980	-1.14454207	0	-0.71004018	-0.71004018	14		
16	ago-1980	-1.47407571	-0.39739132	-1.45160264	-1.45160264	6	0.00019651	
17	sep-1980	-1.58467535	0	-1.45160264	-1.45160264	6		
18	oct-1980	-1.59837571	0	-1.45160264	-1.45160264	6		
19	nov-1980	-1.56642086	0	-1.45160264	-1.45160264	6		
20	dic-1980	-1.54863925	0	-1.45160264	-1.45160264	6		
21	ene-1981	-0.93742896	0	-1.45160264	-1.45160264	6		
22	feb-1981	-0.70403556	0.40897816	-1.03506681	-1.03506681	17	0.01011007	

Figura 5.21. Prueba de cambios de régimen en la media con complemento de Excel

	A	B	C	D	E	F
1	FECHA	SPEI6	RSSI	Var	Reg length	Conf
2	jun-1979	-0.36078066	0	0.32616172	88	
3	jul-1979	-0.37194102	0	0.32616172	88	
4	ago-1979	-0.55016977	0	0.32616172	88	
5	sep-1979	-0.65670555	0	0.32616172	88	
6	oct-1979	-0.84228062	0	0.32616172	88	
7	nov-1979	-0.85567258	0	0.32616172	88	
8	dic-1979	-0.95123926	0	0.32616172	88	
9	ene-1980	-0.7968633	0	0.32616172	88	
10	feb-1980	-0.79325363	0	0.32616172	88	
11	mar-1980	-0.74357806	0	0.32616172	88	
12	abr-1980	-0.46611699	0	0.32616172	88	
13	may-1980	-0.48942521	0	0.32616172	88	
14	jun-1980	-0.91799384	0	0.32616172	88	
15	jul-1980	-1.14454207	0	0.32616172	88	
16	ago-1980	-1.47407571	0	0.32616172	88	
17	sep-1980	-1.58467535	0	0.32616172	88	
18	oct-1980	-1.59837571	0	0.32616172	88	
19	nov-1980	-1.56642086	0	0.32616172	88	
20	dic-1980	-1.54863925	0	0.32616172	88	

Figura 5.22. Prueba de cambios de régimen en la varianza con el complemento de Excel

Se obtuvo un resumen de los resultados de los valores de RSI y RSSI por estación. En los cuadros 5.5 y 5.6 se muestran las frecuencias de ocurrencia de los índices RSSI y RSI negativos, que son los que indican el cambio hacia un régimen de sequía. Se indican los valores de mayor magnitud en cada caso, así como la fecha en que se presentaron.

Cuadro 5.5. Resumen de valores RSI y RSSI para el índice SPEI de 6 meses

Clave estación	Frecuencia de valores de RSI	Valor mínimo RSI	Fecha de mínimo RSI	Frecuencia de valores de RSSI	Valor máximo RSSI	Fecha de máximo RSSI
10001	12	-7.1697	ene-89	11	1.43	ago-96
10004	14	-4.2117	jul-92	6	0.37	jul-88
10005	15	-3.9465	jul-92	11	1.08	ago-88
10021	16	-3.1925	jul-92	6	0.86	jun-86
10023	11	-3.4595	jun-92	9	2.48	jun-82
10024	11	-4.4777	jul-92	4	0.85	ene-87
10029	11	-2.8347	ene-00	5	0.46	ago-03
10030	14	-2.7747	jul-92	13	2.59	jul-94

Clave estación	Frecuencia de valores de RSI	Valor mínimo RSI	Fecha de mínimo RSI	Frecuencia de valores de RSSI	Valor máximo RSSI	Fecha de máximo RSSI
10035	16	-2.5924	jun-92	9	1.13	ene-97
10037	16	-3.0897	jul-92	11	0.74	jul-88
10045	14	-3.4590	jun-92	11	1.55	jun-96
10047	13	-2.9036	jul-92	5	1.04	jun-86
10048	13	-3.2683	jul-92	8	1.50	jul-84
10049	17	-2.4196	dic-07	9	1.23	sep-86
10051	13	-3.6385	jul-92	11	1.37	ago-08
10052	11	-3.1002	jul-92	9	1.19	jun-95
10054	13	-3.1776	jul-92	7	1.93	jun-82
10057	13	-3.6143	jul-92	12	1.93	jul-88
10066	12	-2.6773	jun-92	4	0.79	ene-97
10074	12	-4.5823	jul-92	4	0.08	ago-83
10076	12	-5.7113	jul-92	2	0.10	mar-81
10078	18	-1.9751	mar-82	5	0.59	jun-86
10085	16	-2.0832	jul-92	5	1.06	feb-99
10087	15	-2.5581	oct-97	5	0.64	jul-07
10088	14	-3.6026	ago-97	4	0.07	oct-06
10090	10	-1.5017	jul-92	4	1.75	may-03
10099	16	-2.0233	ene-98	22	2.68	jun-00
10100	14	-2.6846	dic-88	9	0.93	dic-99
10103	14	-4.0252	jul-92	11	1.25	jul-93
10131	16	-3.3151	jun-92	4	0.05	ene-82
10135	14	-2.3804	jul-92	13	3.19	feb-99
10137	13	-3.2283	mar-04	7	2.00	jul-08
10140	16	-3.0930	ene-91	9	1.16	may-86
10141	16	-2.4204	mar-94	9	1.77	feb-04
10144	13	-3.2357	jun-92	8	1.50	mar-94
10147	15	-2.7388	jul-92	4	0.24	abr-08
10149	16	-2.5223	jun-92	8	2.07	abr-91
10165	13	-3.1394	ene-08	7	2.38	ene-85
5004	11	-4.7668	jul-92	9	0.73	dic-95
5027	15	-2.7789	oct-92	7	1.08	ene-81
8171	15	-4.2068	dic-07	6	1.16	may-86
25041	15	-3.1480	jun-05	9	4.53	may-84
25074	13	-2.7123	ene-96	2	0.02	mar-86
25183	8	-1.5313	mar-82	11	2.69	jul-03
32028	12	-3.3484	ene-89	6	0.43	jul-88
Promedio	14	-3.2293		8	1.30	

Cuadro 5.6. Resumen de valores RSI y RSSI para el índice SPI de 6 meses

Clave estación	Frecuencia de valores de RSI	Valor mínimo RSI	Fecha de mínimo RSI	Frecuencia de valores de RSSI	Valor máximo RSSI	Fecha de máximo RSSI
10001	13	-4.34	ene-89	18	3.31	jul-88
10004	14	-2.74	jun-92	10	1.26	jun-01
10005	15	-2.34	jun-92	6	0.16	mar-03
10006	15	-3.06	jul-92	10	0.70	jun-98
10012	14	-2.81	ago-92	9	3.13	jun-01
10016	14	-1.78	jun-92	5	0.28	ene-93
10021	16	-2.45	jul-92	8	1.52	may-86
10023	12	-3.22	jun-92	11	3.90	jun-82
10026	15	-2.24	dic-99	10	1.66	jun-91
10029	9	-2.37	ene-00	5	1.41	dic-91
10030	13	-3.33	jul-92	48	3.22	jul-94
10035	15	-2.88	jul-92	6	1.17	ene-97
10037	11	-3.69	jul-92	14	1.50	feb-99
10045	11	-2.36	mar-94	5	1.07	feb-99
10047	12	-2.92	jul-92	8	1.78	ene-89
10048	11	-4.24	feb-91	13	4.01	jun-82
10051	14	-3.49	jul-97	8	2.54	jul-01
10052	12	-3.39	jul-92	7	2.23	jun-95
10054	11	-2.91	jun-92	11	1.53	mar-85
10057	9	-3.12	jul-92	12	1.57	sep-03
10061	14	-2.52	jul-92	11	1.23	ene-94
10066	13	-2.45	jul-87	7	0.73	mar-08
10074	10	-4.64	jul-92	8	0.67	jun-82
10076	11	-6.48	jul-92	4	0.16	sep-01
10078	15	-2.54	jun-82	9	0.84	ene-08
10085	16	-2.59	jul-83	7	2.37	jul-01
10087	14	-2.98	oct-97	8	0.55	nov-04
10088	13	-3.39	ago-97	12	1.40	jun-82
10099	16	-2.69	ene-08	6	2.16	ene-92
10100	14	-2.63	jun-92	7	1.60	may-98
10103	13	-3.38	jul-92	9	1.72	jul-95
10108	16	-2.51	jul-92	4	1.79	jun-95
10131	12	-2.92	jun-92	11	1.93	jul-03
10132	12	-2.22	may-93	9	5.26	jul-93
10135	11	-1.91	dic-99	16	1.24	ene-99
10137	14	-2.20	may-94	7	0.81	ago-82
10138	13	-3.38	jun-95	11	1.15	feb-91

Clave estación	Frecuencia de valores de RSI	Valor mínimo RSI	Fecha de mínimo RSI	Frecuencia de valores de RSSI	Valor máximo RSSI	Fecha de máximo RSSI
10139	10	-2.16	abr-91	7	4.21	jul-91
10141	15	-2.05	mar-94	11	2.51	feb-04
10144	12	-2.83	jun-92	9	2.06	may-86
10147	12	-2.68	jun-89	5	4.29	jul-89
10149	14	-2.37	jun-95	10	4.94	jun-95
5004	13	-3.78	jul-92	14	1.61	jul-07
5027	15	-3.56	jun-92	11	1.75	ene-81
5029	15	-2.56	jul-92	6	2.56	jul-01
8171	14	-4.05	dic-07	8	1.04	feb-89
25041	13	-2.73	jun-05	8	5.05	may-84
25074	14	-2.07	abr-82	6	2.47	jul-82
32028	10	-3.05	ene-89	8	2.21	jun-80
Promedio	13	-2.96		10	2.00	

Se detectaron en promedio 14 cambios en la media y 8 en la varianza del índice SPEI para 6 meses y 13 en la media y 10 en la varianza del índice SPI para 6 meses. Los valores mínimos de RSI se presentaron en la estación 10001 Atotonilco, en el mes de enero de 1989 para ambos índices. Los valores máximos de RSSI se presentaron en las estaciones 25041 Guatenipa y 10132 San Luis del Cordero, en los meses de mayo de 1984 y julio de 1993 para los índices SPEI y SPI respectivamente.

Para el índice SPEI se detectó un valor máximo de RSI en 20 estaciones en el mes de julio de 1992 y en siete estaciones en junio del mismo año, en las estaciones restantes el RSI máximo se detectó en fechas diferentes. Para el índice SPI se localizaron valores RSI máximos en julio de 1992 en 15 estaciones y durante junio de 1992 en 9 estaciones. El mayor número de RSSI máximos que se presentaron para la misma fecha fueron cuatro en julio de 1988 para el índice SPEI y la misma cantidad en el mes de junio de 1982 para el índice SPI.

Se identificaron áreas del estado que muestran una mayor frecuencia de cambios de régimen en la media y varianza a través del análisis espacial descrito en el apartado 4.3.7. Los mapas obtenidos se presentan en las figuras 5.23 y 5.24 para cambios en la media (RSI) y en la varianza (RSSI), respectivamente.

Se observa que para el índice SPEI de 6 meses, una extensión al norte del estado presenta entre 15 y 17 cambios durante el periodo 1979-2008, este número de

cambios es el más grande de los valores analizados. Para el índice SPI de meses no se presenta ninguna superficie con frecuencias entre 15 y 17 cambios.

Para ambos índices los valores de menor ocurrencia se presentan al Sur del Estado, comprendiendo un área mayor en el índice SPI. Una estación ubicada en el Noroeste presenta la mayor frecuencia para el índice SPEI, mientras que para el índice SPI la frecuencia de cambios RSI fue la menor.

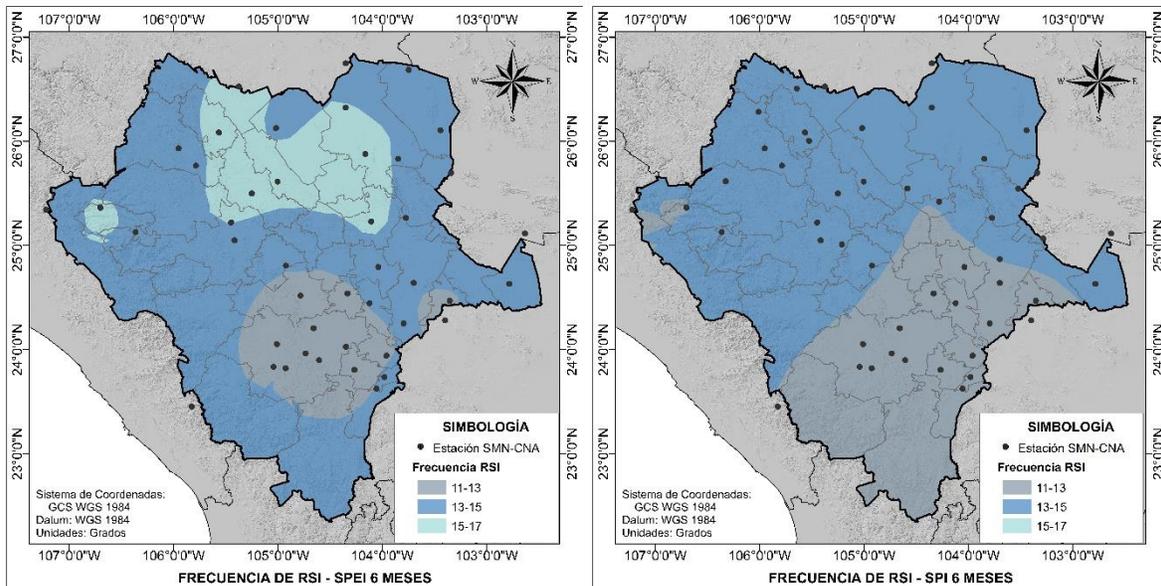


Figura 5.23. Distribución espacial de la frecuencia de valores RSI durante el periodo 1979-2008 en el Estado de Durango

La frecuencia de los valores de cambio RSSI va de 5 a 13 cambios durante el periodo 1979-2008. Para el índice SPEI de 6 meses la menor frecuencia va de 5 a 7 cambios, se presenta al Oeste del Estado, a modo de una franja que va de Norte a Sur; excluyendo una pequeña porción en los límites con Chihuahua y Sinaloa que presenta una frecuencia de 7 a 9 ocurrencias, al igual que la mayor parte del Estado, ya que las frecuencias mayores solamente representan una pequeña área al Este, correspondiente con resultados de únicamente dos estaciones climatológicas.

La frecuencia de RSSI para el índice SPI de 6 meses, muestra únicamente dos categorías de ocurrencia, de 7 a 9 que cubre la mayor parte del Estado y de 9 a 11 distribuida al Oeste, resultado de valores de dos estaciones y una pequeña porción al Este, producto de resultado de una estación.

La detección de cambios en la media y varianza depende del índice de sequía utilizado. Empleando el índice SPEI, las frecuencias muestran una mayor variabilidad al agruparse en un mayor número de categorías que las frecuencias obtenidas para el índice SPI.

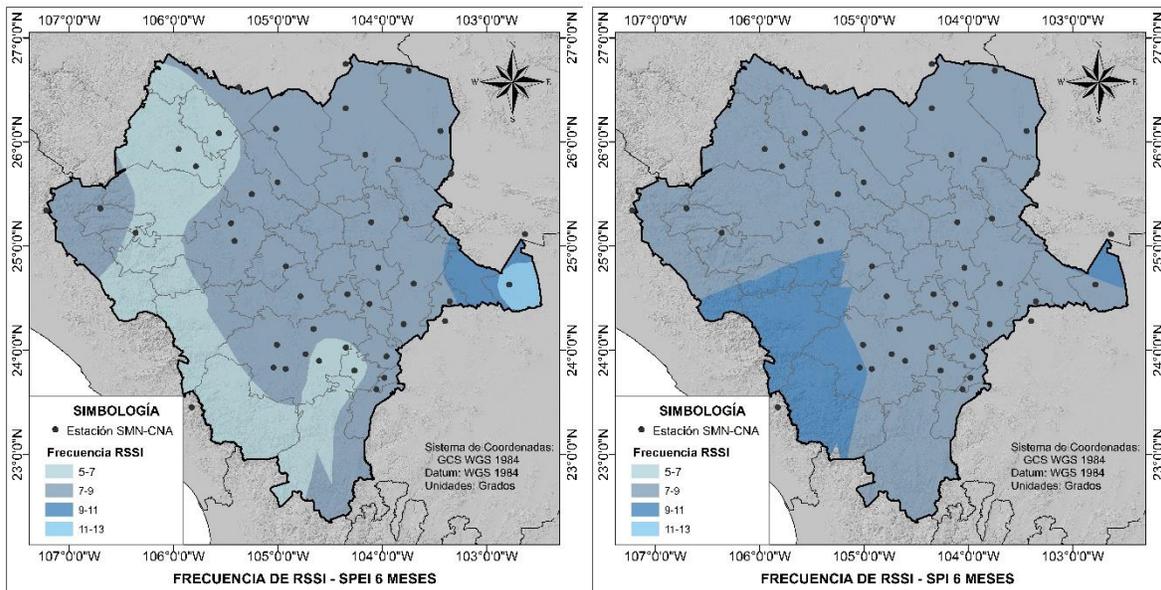


Figura 5.24. Distribución espacial de la frecuencia de valores RSSI durante el periodo 1979-2008 en el Estado de Durango

Para analizar los resultados completos en una estación individual, se representaron mediante gráficas en las que se incluyen los valores calculados de los índices de sequía, así como los valores de RSI y RSSI y la media y varianza promedio. Se eligieron cuatro estaciones en diferentes regiones del Estado, de acuerdo con el análisis espacial de la frecuencia de RSI y RSSI.

La región oeste del estado fue afectada por las categorías más severas de sequía, para esta zona se presentan las gráficas de cambios de media y varianza de la estación 10087 Vascogil para el índice SPEI de 6 meses (figura 5.25). Los valores de RSI negativos se ubicaron en el inicio de los periodos de sequía ocurridos en la estación, es decir que, el método detectó todos los cambios hacia un régimen de sequía.

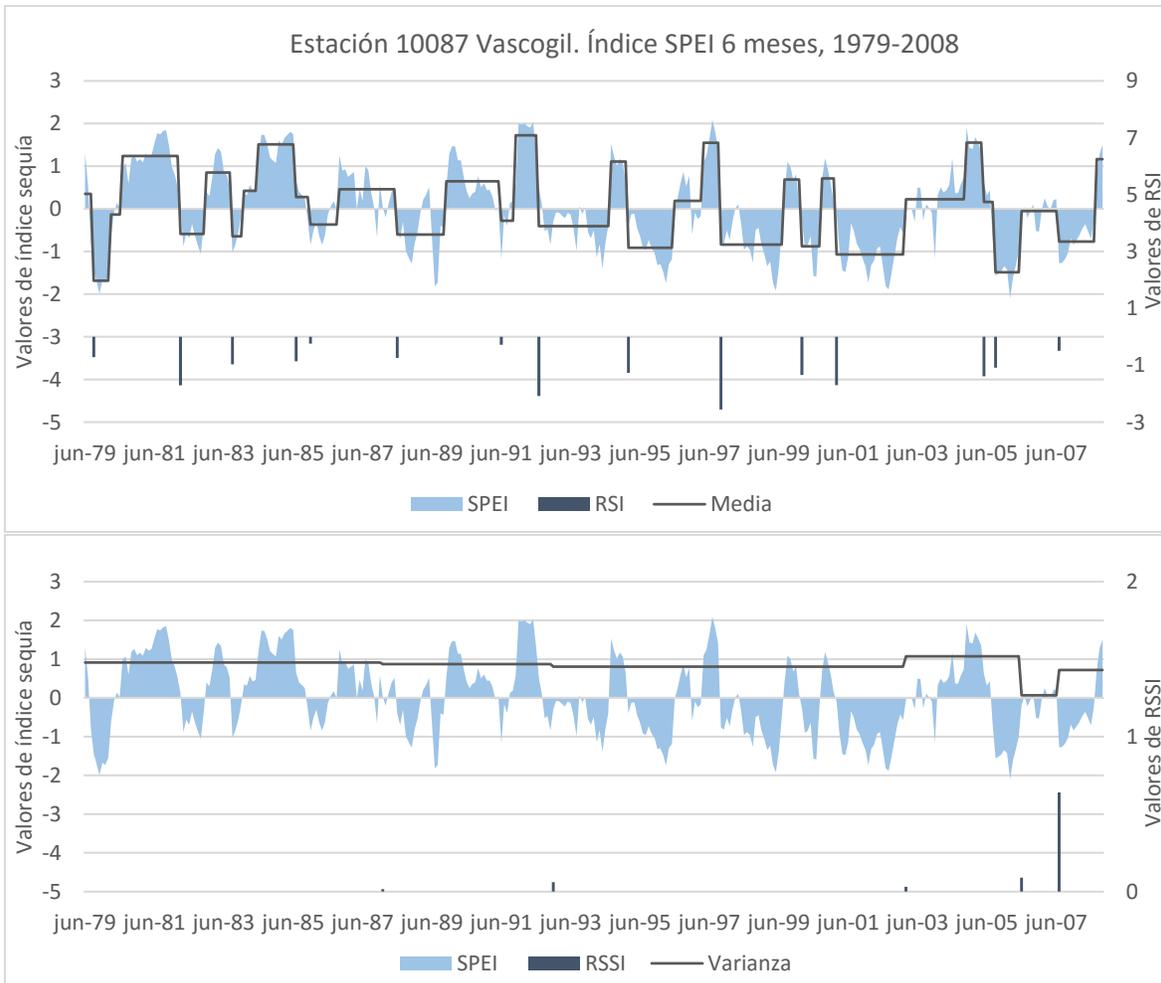


Figura 5.25. Valores de cambio RSI y RSSI para el índice SPEI de 6 meses en la estación 10087 Vascogil ubicada al Oeste del Estado

En la figura 5.26 se presentan los resultados obtenidos con el índice SPI de 6 meses en la estación 10087 Vascogil. Al igual que en el índice SPEI, se detectaron todos los periodos de sequía ocurridos de 1979 a 2008. Los valores mayores de RSI se observaron durante el mes de octubre de 1997.

La varianza calculada se mantuvo relativamente constante durante el periodo de análisis para ambos índices, únicamente en SPI se observan algunos valores pequeños de RSSI durante 1983 y 1985. Sin embargo, al final de la serie en ambos índices se detectaron los cambios de mayor magnitud y así mismo una mayor frecuencia de estos valores.

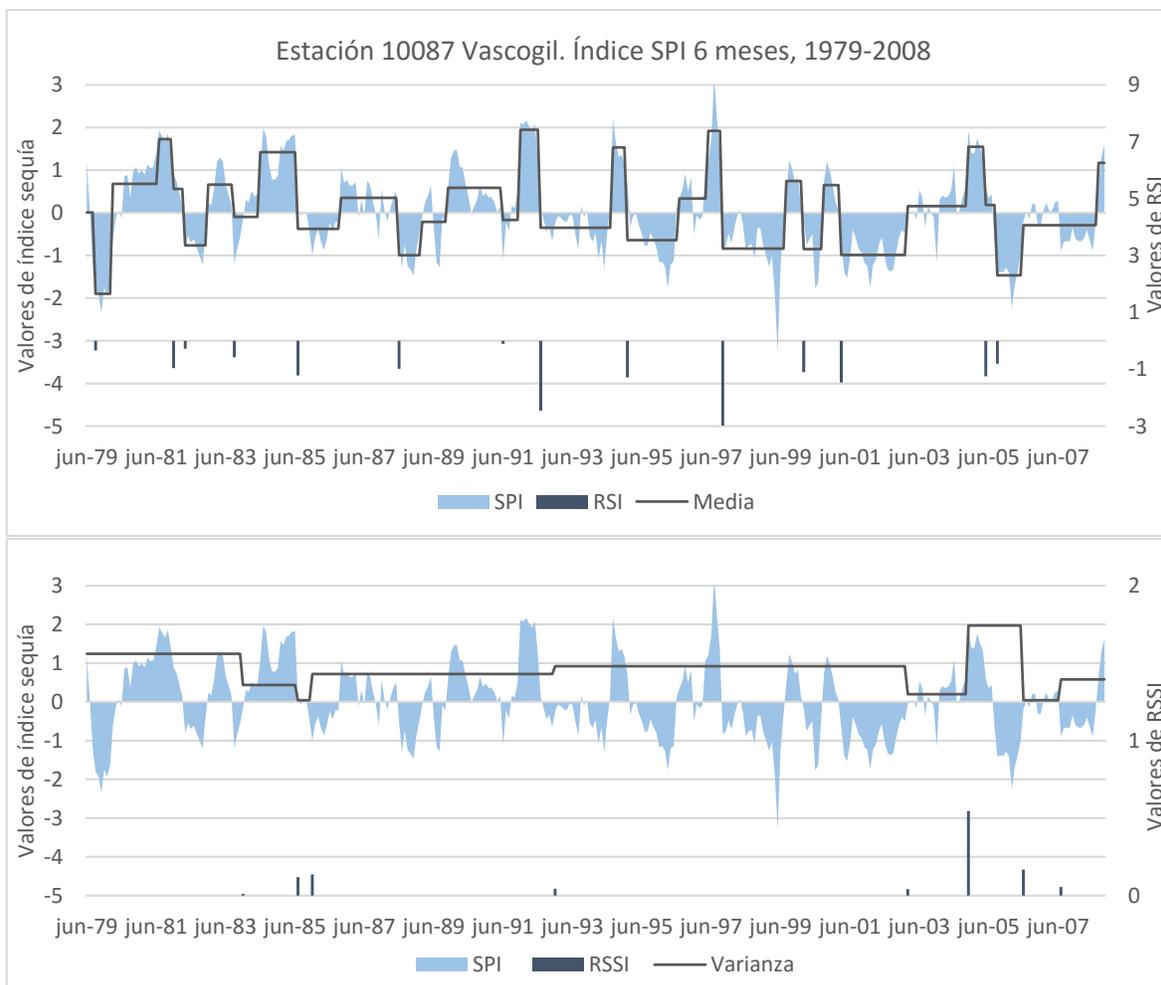


Figura 5.26. Valores de cambio RSI y RSI para el índice SPI de 6 meses en la estación 10087 Vascogil ubicada al Oeste del Estado

En la región Norte se eligió la estación 10078 Sardinias. Para el índice SPEI de 6 meses se presentan las gráficas de valores de RSI y RSI en la figura 5.27 y para el índice SPI de 6 meses se muestran los resultados en la figura 5.28.

Se observa que para ambos índices la frecuencia de ocurrencia de valores RSI es mayor que en la estación 10087 analizada anteriormente. El valor de mayor magnitud ocurrió en el mismo año (1982) pero en diferente mes.

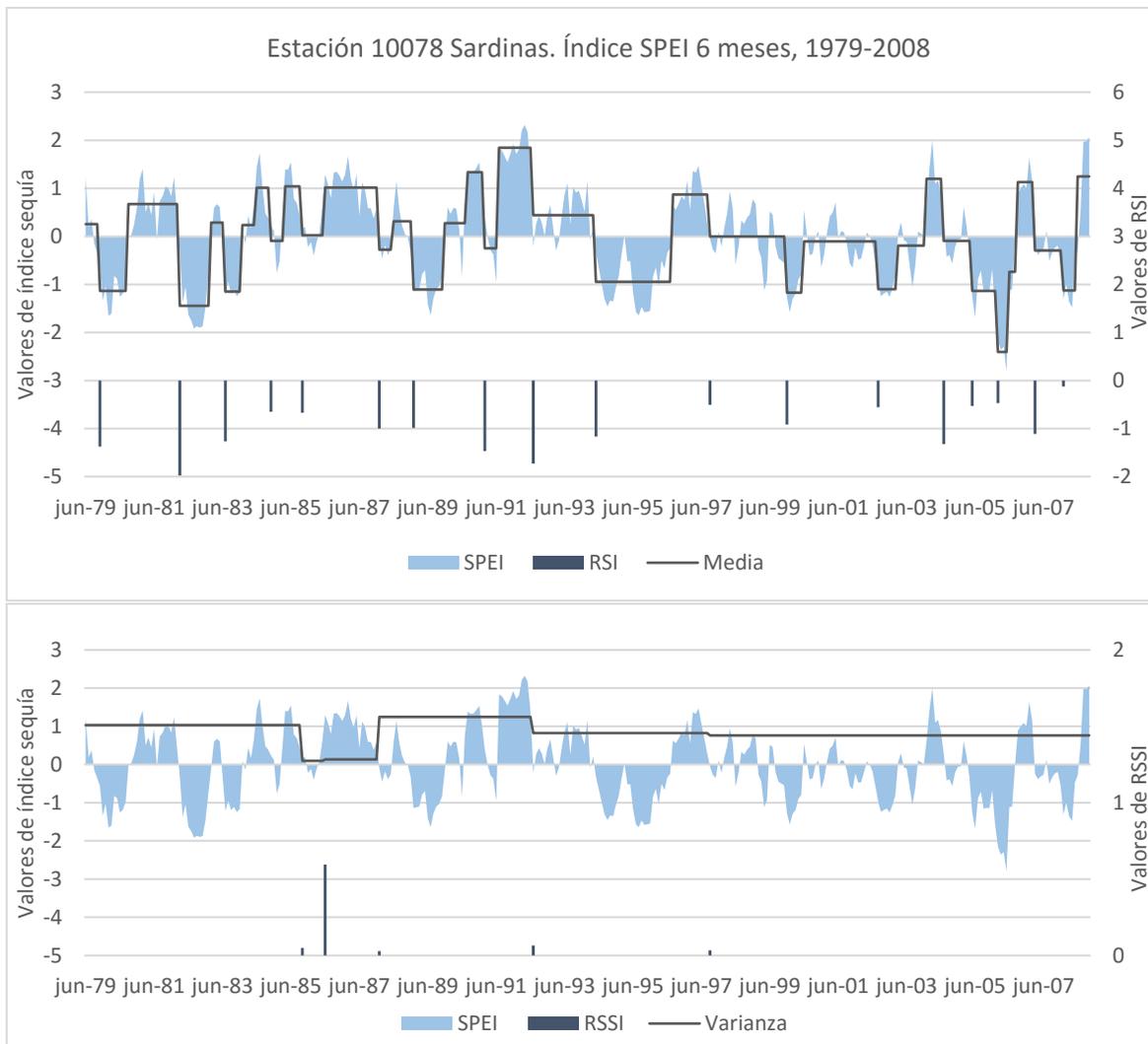


Figura 5.27. Valores de cambio RSI y RSSI para el índice SPEI de 6 meses en la estación 10078 Sardinas ubicada al Norte del Estado

Los valores de RSSI tienen un comportamiento diferente en cada índice de sequía, en SPEI se observan la mayor parte de los valores al inicio o mitad de la serie y para SPI la mayor cantidad de valores RSSI se detectaron al final de la serie, en los años 2005, 2006 y 2007. Coinciden los valores obtenidos en los años de 1985 y 1992, para ambos índices se calcularon valores RSSI.

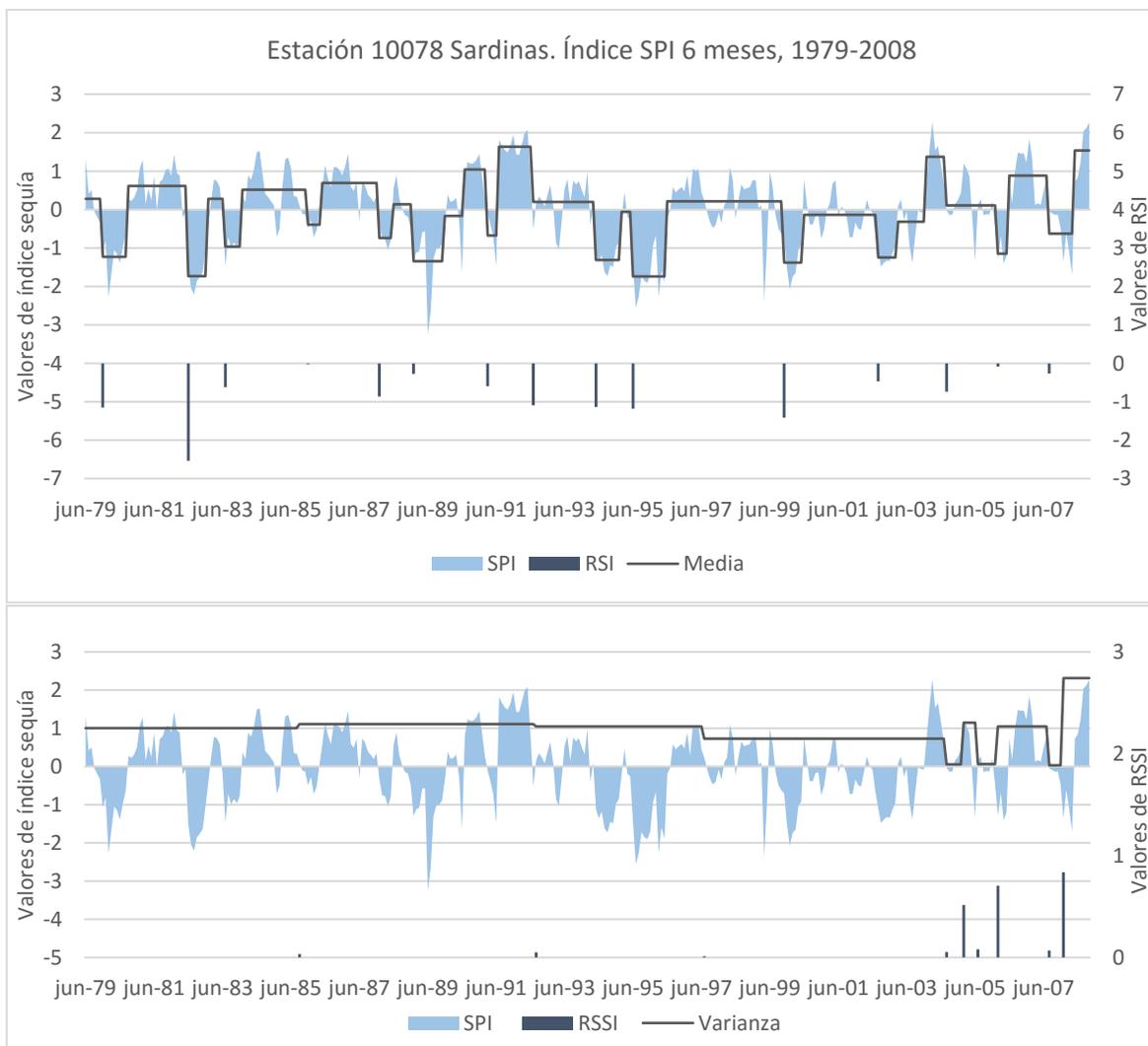


Figura 5.28. Valores de cambio RSI y RSSI para el índice SPI de 6 meses en la estación 10078 Sardinas ubicada al Norte del Estado

Para la región Noreste del Estado se presenta la estación 10045 Mapimí. Las gráficas de resultados para los índices SPEI y SPI de meses y valores de RSI y RSSI se presentan en las figuras 5.29 y 5.30.

Una diferencia específica en esta estación es en los valores de los índices de sequía, para SPEI ocurrió un periodo prolongado que tiende hacia sequía sin ninguna ocurrencia de valores húmedos de 1995 a 2001, mientras que SPI indicó algunos intervalos húmedos durante el mismo periodo.

Esta diferencia influye directamente en los valores de RSI y RSSI. Para el índice SPEI hubo menor frecuencia de valores RSI negativos que para SPI, sin embargo,

estos se distribuyen al largo de la serie de tiempo, mientras que para SPI los valores detectados de RSI se concentran durante el periodo de 1995 a 2001. Al alternar periodos húmedos con un periodo que se detectó como mayormente seco, ocurren más cambios significativos de régimen.

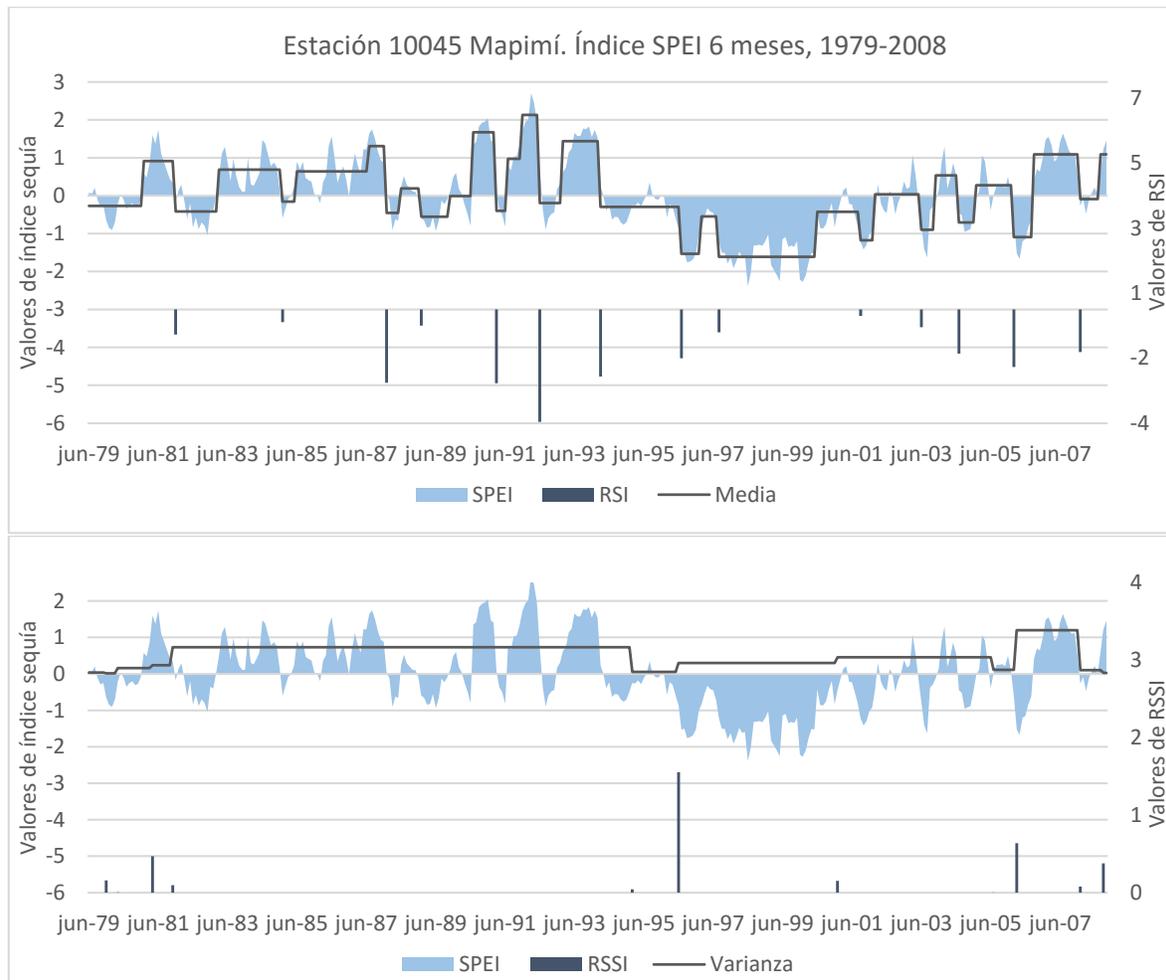


Figura 5.29. Valores de cambio RSI y RSSI para el índice SPEI de 6 meses en la estación 10045 Mapimí ubicada al Noreste del Estado

Los valores RSSI tienen un comportamiento similar a los RSI, para SPEI se observa una ocurrencia durante todo el periodo de análisis, mientras que para SPI todos los valores calculados de RSSI se localizaron dentro del periodo de 1992 a 1996. Ninguno de los valores de RSSI se detectó en la misma fecha para ambos índices, ni en fechas cercanas. Los valores de mayor magnitud se presentaron en junio de 1996 y febrero de 1999 para los índices SPEI y SPI respectivamente. Para el índice

SPEI la mayor frecuencia de cambios ocurrieron al principio y al final de la serie, durante los periodos de 1979 a 1981 y de 2005 a 2008.

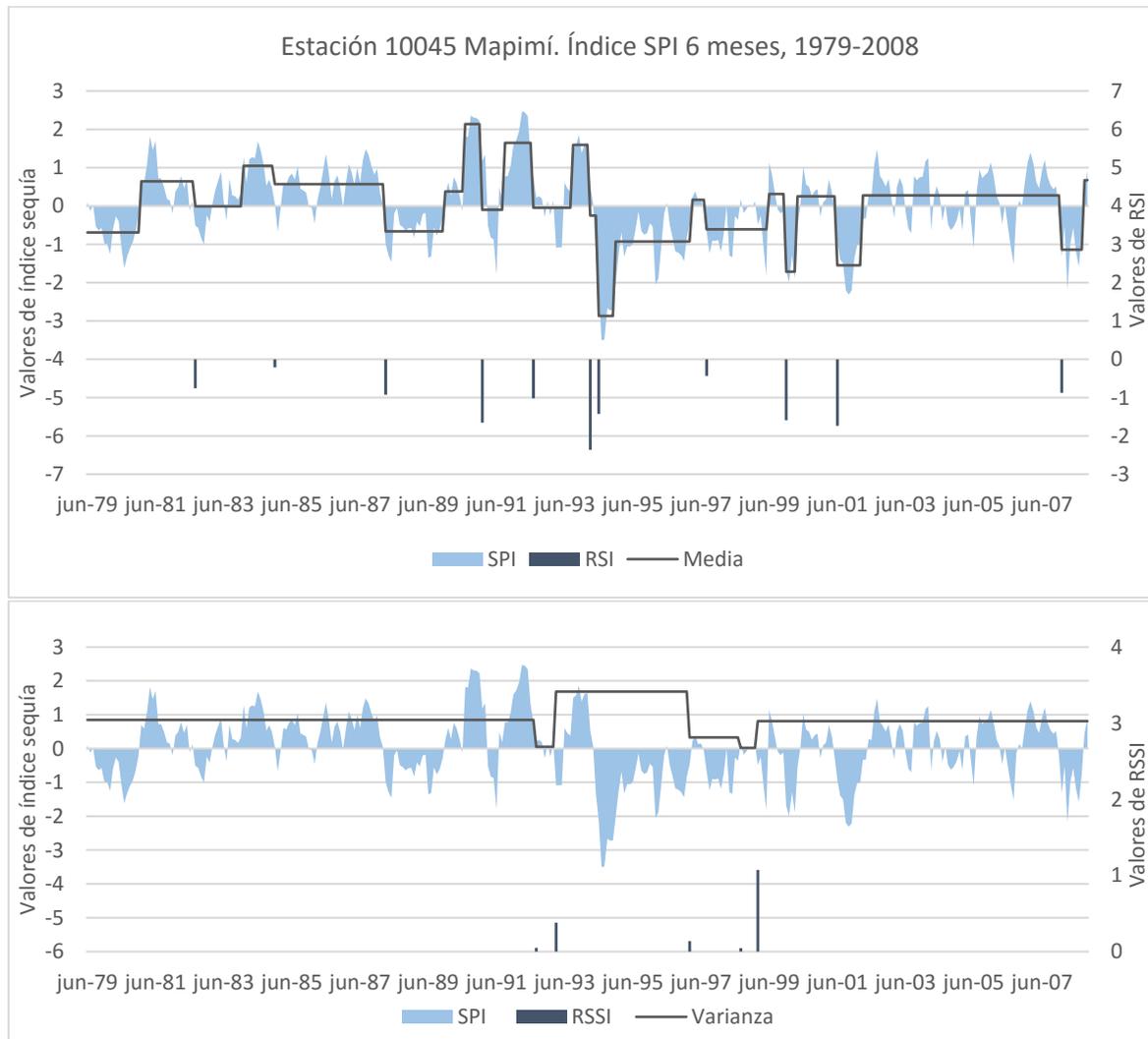


Figura 5.30. Valores de cambio RSI y RSSI para el índice SPI de 6 meses en la estación 10045 Mapimí ubicada al Noreste del Estado

La estación 10047 Narciso Mendoza se ubica en la región Sureste del Estado, en las figuras 5.31 y 5.32 se presentan los resultados de los índices de sequía SPEI y SPI de 6 meses incluyendo los valores detectados de cambios en la media y varianza RSI y RSSI.

En general los resultados para RSI negativos son similares en ambos índices, 11 cambios se detectaron en la misma fecha o en fechas muy cercanas, únicamente un valor RSI obtenido en diciembre de 1984 para SPEI no se detectó en el índice

SPI. Los valores de mayor magnitud se observan en el periodo de julio de 1987 a 1992, siendo en julio de 1992 donde se presentó el máximo. De agosto de 1997 a diciembre de 2000 se observa la mayor frecuencia de cambios en la media.

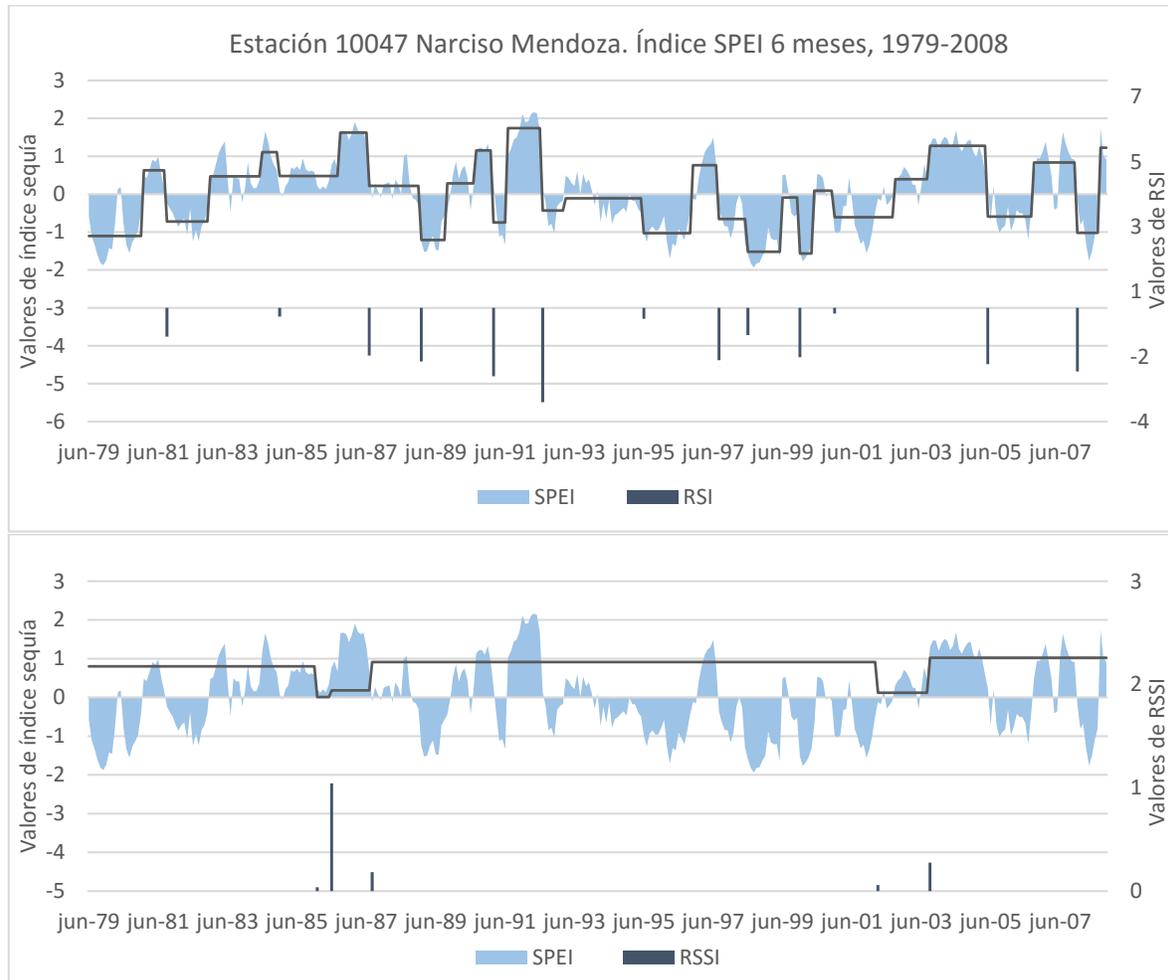


Figura 5.31. Valores de cambio RSI y RSSI para el índice SPEI de 6 meses en la estación 10047 Narciso Mendoza ubicada al Sureste del estado

En cuanto a los valores de RSSI se observa que la mayoría de los valores en SPEI ocurrieron en la misma fecha o fechas cercanas que para SPI. Para SPEI se observa una mayor frecuencia de valores RSSI de 1985 a 1987, para SPI la mayor frecuencia se presenta de 1985 a 1989.

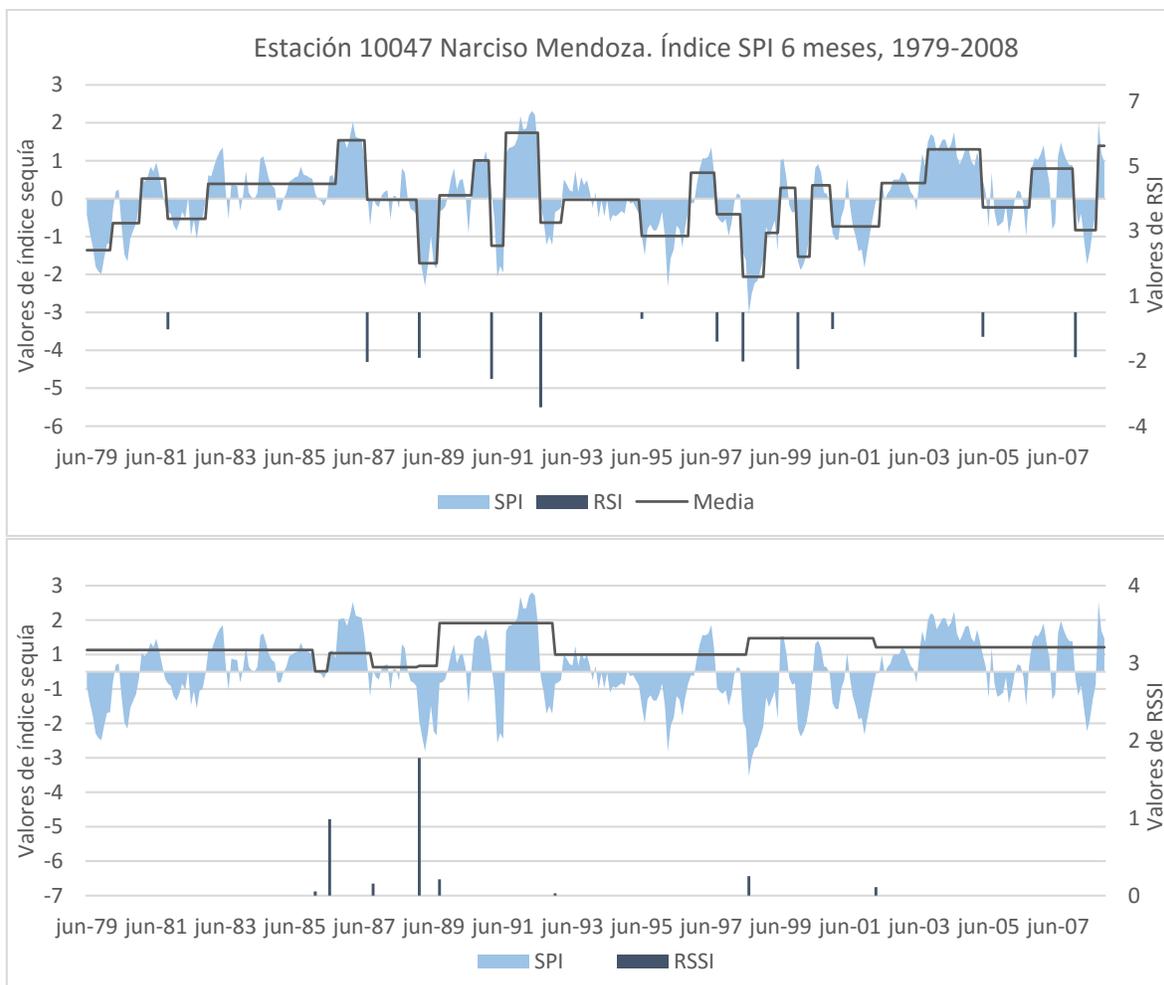


Figura 5.32. Valores de cambio RSI y RSSI para el índice SPI de 6 meses en la estación 10047 Narciso Mendoza ubicada al Sureste del estado

En las estaciones analizadas, tanto para SPEI como para SPI, se detectaron cambios de régimen al inicio de todos los periodos de sequía. En las estaciones 10045 y 10047, se detectaron cambios durante un periodo prolongado de sequía (1997-2000), es decir, sin presentarse un periodo húmedo, el algoritmo produjo el cálculo de RSI.

Por lo anterior, el cálculo de RSI es útil para detectar si una sequía continuará, ya que el valor negativo de RSI indica que los valores de clasificación de sequía de los índices seguirán en la misma tendencia.

Aparentemente la magnitud de los valores RSI (de la media) se relacionan con la magnitud del cambio de régimen, es decir que, si los índices de sequía se encuentran en valores grandes de humedad (positivo) o de sequía (negativo). El

cambio inmediatamente a un valor grande de la condición contraria, el valor de RSI será de mayor magnitud.

Los valores máximos de RSI ocurrieron en diversas fechas en las estaciones analizadas, sin embargo, como se mencionó anteriormente, se detectó que una gran parte ocurrió durante los meses de junio y julio de 1992. De acuerdo con estos resultados, se puede suponer que los cambios se relacionan con alguna condición presente en el clima durante esa fecha.

Escobar Pedraza *et al* (2012) analizaron la relación de la lluvia con fenómenos del cambio climático en la estación 10078, en sus resultados se advierte el término de un evento de “El Niño” en el mes de julio de 1992, concluyeron que los periodos de sequía en dicha estación, pueden estar influenciados por el fenómeno de El Niño.

Por otra parte, los cambios de la varianza no indican un comportamiento general de la sequía, sino que es particular de acuerdo con el índice utilizado. La varianza es muy sensible a los valores extremos, por lo que la interpretación de los resultados se inclina hacia un cambio rápido en los valores de los índices de sequía.

En las estaciones analizadas, los valores máximos de RSSI no coinciden con los valores máximos de RSI, en cambio los máximos de RSSI se observan en una variación de la media de los índices de sequía. Lo cual es de esperarse, ya que el índice de varianza, indica la dispersión de los valores con respecto a su media.

Con lo anterior se puede inferir que los valores de RSSI serán útiles para detectar cambios hacia un periodo prolongado de sequía, sin embargo, cuando los periodos de humedad se alternen con periodos de sequía con la misma magnitud y duración, no se detectarán cambios en la varianza. Por lo cual, los valores de RSSI se deben utilizar como un complemento de los valores RSI. Con ambas pruebas es posible que se detecte con mayor certeza los periodos de sequía prolongados y de mayor severidad y duración.

5.8 Análisis de tendencias en los cambios de media y varianza

Se analizó la frecuencia de los valores de cambio RSI y RSSI de la media y varianza en los índices de sequía mediante la suma de valores cada cinco y diez años. De esta manera se identifica la tendencia de la frecuencia de cambios; es decir, si ha aumentado o disminuido la ocurrencia de cambios en la media y varianza de los índices de sequía.

En los cuadros 5.7 y 5.8 se presentan los resultados por estación meteorológica de frecuencias cada cinco años (quinquenal) para los cambios en media y varianza de los índices SPEI y SPI de 6 meses, respectivamente.

Para ambos índices, la suma de los cambios totales en la media, muestran un comportamiento parecido, con valores para cada quinquenio muy cercanos. Para los dos índices el valor menor ocurrió durante el periodo de 2000-2004. Para SPEI de 6 meses el valor mayor ocurrió en el periodo 1990-1994 y para SPI durante 1995-1999. En promedio se detectaron de 1.3 a 2.7 cambios por estación en el índice SPEI de 6 meses, y para SPI de la misma escala el promedio de cambios por estación fue de 1.3 a 2.5.

Los valores promedios RSSI de la varianza presentan un comportamiento diferente de acuerdo al índice analizado. Los valores totales para el índice SPEI de 6 meses van de 52 a 78 cambios con un promedio de 1.2 a 1.7 por estación; para el índice SPI de 6 meses los cambios totales son de 65 a 87 con un promedio de 1.3 a 1.9 por estación.

Los cambios detectados en la media muestran un aumento en los periodos 1985-1989, 1990-1994 y 1994-1999, luego descienden al valor menor en el periodo 2000-2004 y durante el último periodo 2004-2008 aumentan de nuevo, pero sin llegar a los valores máximos de los periodos anteriores.

La tendencia de la varianza presenta valores más constantes, por lo cual no se identifica una tendencia clara. Para el índice SPEI de 6 meses se observa un aumento durante los periodos 1985-1989 y 2000-2004, mientras los otros tienen valores similares. Para el índice SPI de 6 meses, también se observa un incremento en los periodos 1985-1989 y 2000-2004, pero el mayor se presenta durante 1990-1994. Los periodos restantes tienen una magnitud similar.

Cuadro 5.7. Frecuencia quinquenal de los valores de cambio de media y varianza para el índice SPEI de 6 meses

CLAVE ESTACIÓN	FRECUENCIA DE CAMBIOS EN LA MEDIA (RSI)						FRECUENCIA DE CAMBIOS EN LA VARIANZA (RSSI)					
	1980-1984	1985-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2004-2008	1980-1984	1985-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2004-2008
10001	3	2	3	1	1	2	0	1	3	2	0	5
10004	2	3	3	2	1	2	0	3	1	0	2	0
10005	3	3	2	3	1	2	1	3	3	3	0	1
10021	3	2	3	2	2	3	0	3	1	0	2	0
10023	1	3	3	2	0	2	3	2	0	2	1	1
10024	2	3	2	3	0	1	0	2	1	0	1	0
10029	2	2	2	2	2	1	0	1	0	0	3	1
10030	3	2	3	3	1	2	3	2	2	2	2	2
10035	3	3	3	2	1	3	2	1	0	2	2	3
10037	2	3	2	4	2	3	0	5	1	2	2	1
10045	1	3	3	2	3	2	3	0	0	2	1	4
10047	2	2	2	4	1	3	0	3	0	0	2	0
10048	2	3	2	2	1	3	3	1	1	2	1	0
10049	4	2	5	2	2	3	3	2	0	0	3	1
10051	3	2	3	2	1	3	3	0	1	0	3	4
10052	1	3	2	2	0	4	0	3	3	3	0	0
10054	1	3	3	2	2	3	2	2	0	0	1	2
10057	1	2	2	4	0	4	2	5	2	0	2	1
10066	1	3	3	2	1	2	2	0	0	2	0	0
10074	2	3	3	1	0	3	1	0	1	0	1	1
10076	2	2	3	1	1	4	1	0	1	0	0	0
10078	3	3	3	2	2	4	0	3	1	1	0	0
10085	2	3	3	3	1	3	0	0	1	2	1	1
10087	2	3	2	2	2	3	0	1	1	0	1	2
10088	4	3	2	2	1	3	0	1	1	0	1	1

CLAVE ESTACIÓN	FRECUENCIA DE CAMBIOS EN LA MEDIA (RSI)						FRECUENCIA DE CAMBIOS EN LA VARIANZA (RSSI)					
	1980-1984	1985-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2004-2008	1980-1984	1985-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2004-2008
10090	1	2	2	1	2	2	0	0	0	0	3	1
10099	2	2	4	2	3	3	4	5	4	3	4	2
10100	3	1	2	4	1	3	2	1	0	2	0	4
10103	2	4	3	3	0	3	0	4	3	1	2	1
10131	3	2	4	3	2	2	1	0	1	1	0	1
10135	2	3	2	4	1	2	3	3	1	5	0	1
10137	2	2	3	2	4	0	0	0	2	3	0	2
10140	2	5	3	2	1	3	3	2	2	1	1	0
10141	3	3	4	2	1	3	0	1	2	1	4	1
10144	3	2	3	1	2	2	0	2	2	3	1	0
10147	3	3	3	2	2	2	0	0	0	0	2	2
10149	3	3	3	3	0	3	1	0	3	0	3	1
10165	1	3	3	1	1	3	1	3	3	0	0	0
5004	2	3	2	2	0	2	1	1	1	2	1	3
5027	2	3	4	2	3	1	2	1	0	2	2	0
8171	1	3	3	2	2	4	0	4	2	0	0	0
25041	3	3	1	3	2	3	2	3	0	1	2	1
25074	3	3	2	3	1	1	1	1	0	0	0	0
25183	1	0	2	2	2	1	3	1	0	2	3	2
32028	2	3	2	2	1	2	0	2	2	0	2	0
Promedio	2.2	2.6	2.7	2.3	1.3	2.5	1.2	1.7	1.2	1.2	1.4	1.2
Total	99	119	122	103	60	113	53	78	53	52	62	53

Cuadro 5.8. Frecuencia quinquenal de los valores de cambio de media y varianza para el índice SPI de 6 meses

CLAVE ESTACIÓN	FRECUENCIA DE CAMBIOS EN LA MEDIA (RSI)						FRECUENCIA DE CAMBIOS EN LA VARIANZA (RSSI)					
	1980-1984	1985-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2004-2008	1980-1984	1985-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2004-2008
10001	3	2	3	2	1	2	5	2	4	5	1	1
10004	2	2	3	3	1	3	1	1	1	3	3	1
10005	3	2	2	3	1	3	0	1	1	0	3	1
10006	1	3	3	3	2	2	1	2	1	3	1	2
10012	2	3	3	2	1	4	1	2	0	1	3	2
10016	1	3	2	3	3	2	0	2	2	0	0	1
10021	3	2	4	2	2	3	2	3	0	1	2	0
10023	1	3	3	3	0	3	2	1	1	5	1	1
10026	2	3	2	4	1	2	1	1	4	1	1	2
10029	2	1	1	2	2	1	0	2	2	0	1	0
10030	2	2	3	3	1	2	10	8	8	7	9	6
10035	3	2	3	3	2	2	1	1	0	2	1	1
10037	2	1	1	4	1	2	2	2	2	2	5	1
10045	2	1	4	2	1	1	0	0	2	3	0	0
10047	1	2	2	4	1	3	0	5	1	1	1	0
10048	1	4	2	2	0	3	4	1	3	4	1	0
10051	2	2	3	3	2	3	1	0	1	2	3	1
10052	1	3	2	2	1	3	0	2	1	4	0	0
10054	1	3	3	2	1	1	5	3	0	0	1	2
10057	1	2	2	3	0	1	3	5	1	0	2	1
10061	3	2	2	3	2	2	0	2	2	4	0	3
10066	1	3	3	2	3	1	1	0	1	3	0	2
10074	1	2	3	2	0	2	2	2	1	2	1	0
10076	2	2	3	2	0	3	1	0	1	0	2	0
10078	2	3	3	2	2	2	0	1	1	1	1	5

CLAVE ESTACIÓN	FRECUENCIA DE CAMBIOS EN LA MEDIA (RSI)						FRECUENCIA DE CAMBIOS EN LA VARIANZA (RSSI)					
	1980-1984	1985-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2004-2008	1980-1984	1985-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2004-2008
10085	2	3	3	4	1	2	1	2	1	0	3	0
10087	3	2	2	2	2	2	1	2	1	0	2	2
10088	3	3	2	3	1	1	2	1	1	1	4	3
10099	2	2	3	3	3	3	0	0	3	2	0	1
10100	3	1	2	4	1	3	1	2	0	4	0	0
10103	2	4	3	2	1	2	0	4	3	1	1	0
10108	3	2	3	4	1	3	0	0	1	2	1	0
10131	2	1	3	2	1	3	4	2	0	1	3	1
10132	1	1	3	3	2	2	0	0	3	4	2	0
10135	1	3	1	3	1	2	3	5	1	4	2	1
10137	3	1	4	2	2	3	2	0	0	2	2	1
10138	3	3	2	2	1	2	2	0	2	2	3	2
10139	2	2	2	1	1	3	1	1	2	1	0	2
10141	2	3	4	1	2	3	1	2	0	4	2	2
10144	2	1	4	2	1	2	0	4	0	1	3	1
10147	2	3	2	1	1	3	2	1	1	0	1	0
10149	2	3	2	3	0	3	0	0	3	2	2	3
5004	2	2	2	3	2	2	1	2	1	3	2	5
5027	3	3	3	3	1	2	3	2	2	0	1	3
5029	3	3	2	3	2	3	1	1	1	0	3	0
8171	2	3	2	3	2	3	0	3	3	0	2	0
25041	3	3	1	3	1	2	2	1	0	2	1	3
25074	2	3	2	4	1	1	3	0	0	1	0	2
32028	2	2	2	2	1	1	2	3	1	0	2	0
Promedio	2.0	2.3	2.5	2.6	1.3	2.3	1.5	1.8	1.4	1.9	1.7	1.3
Total	100	115	124	129	63	112	75	87	71	91	85	65

En los cuadros 5.9 y 5.10 se presentan los resultados por estación meteorológica para las frecuencias calculadas cada diez años (decadal) de media y varianza para los índices SPI y SPEI de 6 meses, respectivamente.

La tendencia de la media muestra que la ocurrencia de cambios fue mayor en la segunda década de análisis (1990-1999), durante la cual se presentan la mayor cantidad de cambios detectados en el Estado de Durango. La década de menor frecuencia de cambios fue 2000-2008, en la cual, para ambos índices la ocurrencia fue la de menor magnitud. El promedio de cambios detectados por estación fue de 3.8 a 5 para SPEI de 6 meses y de 3.6 a 5.2 para SPI de 6 meses.

Para la varianza los valores son más próximos entre sí, teniendo promedios de 2.6 a 2.9 para SPEI de 6 meses y de 3.1 a 3.3 para el índice SPI de 6 meses. Esta situación no permite definir de manera clara una tendencia de los cambios en la varianza. De manera general se observa que la primera década de análisis (1980-1989) es la que presentó mayor frecuencia de cambios en la varianza; sin embargo, para SPI el valor se repite en la siguiente década, por lo que durante 20 años el promedio de cambios fue relativamente constante.

Cuadro 5.9. Frecuencia decadal de los valores de cambio de media y varianza para el índice SPEI de 6 meses

CLAVE ESTACIÓN	FRECUENCIA DE CAMBIOS EN LA MEDIA (RSI)			FRECUENCIA DE CAMBIOS EN LA VARIANZA (RSSI)		
	1980-1989	1990-1999	2000-2008	1980-1989	1990-1999	2000-2008
10001	5	4	3	1	5	5
10004	5	5	3	3	1	2
10005	6	5	3	4	6	1
10021	5	5	5	3	1	2
10023	4	5	2	5	2	2
10024	5	5	1	2	1	1
10029	4	4	3	1	0	4
10030	5	6	3	5	4	4
10035	6	5	4	3	2	5
10037	5	6	5	5	3	3
10045	4	5	5	3	2	5
10047	4	6	4	3	0	2
10048	5	4	4	4	3	1
10049	6	7	5	5	0	4
10051	5	5	4	3	1	7
10052	4	4	4	3	6	0

CLAVE ESTACIÓN	FRECUENCIA DE CAMBIOS EN LA MEDIA (RSI)			FRECUENCIA DE CAMBIOS EN LA VARIANZA (RSSI)		
	1980-1989	1990-1999	2000-2008	1980-1989	1990-1999	2000-2008
10054	4	5	5	4	0	3
10057	3	6	4	7	2	3
10066	4	5	3	2	2	0
10074	5	4	3	1	1	2
10076	4	4	5	1	1	0
10078	6	5	6	3	2	0
10085	5	6	4	0	3	2
10087	5	4	5	1	1	3
10088	7	4	4	1	1	2
10090	3	3	4	0	0	4
10099	4	6	6	9	7	6
10100	4	6	4	3	2	4
10103	6	6	3	4	4	3
10131	5	7	4	1	2	1
10135	5	6	3	6	6	1
10137	4	5	4	0	5	2
10140	7	5	4	5	3	1
10141	6	6	4	1	3	5
10144	5	4	4	2	5	1
10147	6	5	4	0	0	4
10149	6	6	3	1	3	4
10165	4	4	4	4	3	0
5004	5	4	2	2	3	4
5027	5	6	4	3	2	2
8171	4	5	6	4	2	0
25041	6	4	5	5	1	3
25074	6	5	2	2	0	0
25183	1	4	3	4	2	5
32028	5	4	3	2	2	2
Promedio	4.8	5.0	3.8	2.9	2.3	2.6
Total	218	225	173	131	105	115

Cuadro 5.10. Frecuencia decadal de los valores de cambio de media y varianza para el índice SPI de 6 meses

CLAVE ESTACIÓN	FRECUENCIA DE CAMBIOS EN LA MEDIA (RSI)			FRECUENCIA DE CAMBIOS EN LA VARIANZA (RSSI)		
	1980-1989	1990-1999	2000-2008	1980-1989	1990-1999	2000-2008
10001	5	5	3	7	9	2
10004	4	6	4	2	4	4
10005	5	5	4	1	1	4
10006	4	6	4	3	4	3
10012	5	5	5	3	1	5
10016	4	5	5	2	2	1
10021	5	6	5	5	1	2
10023	4	6	3	3	6	2
10026	5	6	3	2	5	3
10029	3	3	3	2	2	1
10030	4	6	3	18	15	15
10035	5	6	4	2	2	2
10037	3	5	3	4	4	6
10045	3	6	2	0	5	0
10047	3	6	4	5	2	1
10048	5	4	3	5	7	1
10051	4	6	5	1	3	4
10052	4	4	4	2	5	0
10054	4	5	2	8	0	3
10057	3	5	1	8	1	3
10061	5	5	4	2	6	3
10066	4	5	4	1	4	2
10074	3	5	2	4	3	1
10076	4	5	3	1	1	2
10078	5	5	4	1	2	6
10085	5	7	3	3	1	3
10087	5	4	4	3	1	4
10088	6	5	2	3	2	7
10099	4	6	6	0	5	1
10100	4	6	4	3	4	0
10103	6	5	3	4	4	1
10108	5	7	4	0	3	1
10131	3	5	4	6	1	4
10132	2	6	4	0	7	2
10135	4	4	3	8	5	3
10137	4	6	5	2	2	3

CLAVE ESTACIÓN	FRECUENCIA DE CAMBIOS EN LA MEDIA (RSI)			FRECUENCIA DE CAMBIOS EN LA VARIANZA (RSSI)		
	1980-1989	1990-1999	2000-2008	1980-1989	1990-1999	2000-2008
10138	6	4	3	2	4	5
10139	4	3	4	2	3	2
10141	5	5	5	3	4	4
10144	3	6	3	4	1	4
10147	5	3	4	3	1	1
10149	5	5	3	0	5	5
5004	4	5	4	3	4	7
5027	6	6	3	5	2	4
5029	6	5	5	2	1	3
8171	5	5	5	3	3	2
25041	6	4	3	3	2	4
25074	5	6	2	3	1	2
32028	4	4	2	5	1	2
Promedio	4.4	5.2	3.6	3.3	3.3	3.1
Total	215	253	175	162	162	150

Los resultados obtenidos indican que los cambios en media y varianza no han sido mayores durante los últimos años del periodo de estudio, lo cual era una posibilidad al considerar que el calentamiento global puede estar influyendo en el régimen climático del área de estudio.

El mayor número de cambios en la media y varianza se identificaron durante el periodo de 1990 a 1999, para una mayor comprensión de los factores que causaron estos, es necesarios profundizar en los fenómenos ocurridos durante este periodo y buscar alguna relación particular con el fenómeno de la sequía.

6 CONCLUSIONES

Se caracterizó el comportamiento espacial y temporal del fenómeno de la sequía en el Estado de Durango. El comportamiento temporal de los índices indicó que la frecuencia con que ocurren sequías extremas es similar a la frecuencia de periodos extremadamente húmedos, lo que indica que las sequías es una característica normal del clima en la región.

La distribución espacial indicó que las áreas afectadas por la categoría Extremadamente seca, fueron al Oeste del Estado; en el Norte y Noreste fue generalmente Muy seco, mientras que en el Centro y Sureste del Estado principalmente se presentaron condiciones Moderadamente secas, con esporádicos episodios de clase Muy seca.

Los valores de cambios de la media (RSI) de signo negativo, identificaron los periodos de sequía. Se detectaron 14 cambios en promedio para el índice SPEI de 6 meses y 13 cambios para el índice SPI de 6 meses. Por lo que en promedio el SPEI se presentó más cambios en la media con respecto al SPI en el Estado.

Los valores de cambio en la varianza (RSSI) fueron 8 para el índice SPEI de 6 meses y 10 para el índice SPI de 6 meses. Así en promedio el SPI presentó más cambios en la varianza con respecto al SPEI en el Estado.

Las tendencias de los cambios en la media y varianza de los índices de sequía con base en la frecuencia de los cambios en la media disminuyó durante el periodo 2000-2004 y aumentó durante 2005-2008. La década de mayores cambios en la media fue 1990-1999. Para la varianza se observó una frecuencia máxima de cambios durante el periodo 1985-1989, los cambios se mantuvieron constantes durante los últimos 20 años. La década de mayores cambios en la varianza fue de 1980-1989.

7 LITERATURA CITADA

- Abramowitz, M., Stegun, I. A. & Miller, D. (1965). Handbook of Mathematical Functions With Formulas, Graphs and Mathematical Tables. *Journal of Applied Mechanics*. DOI: 10.1115/1.3625776
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. & Ab, W. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, 1–15. DOI: 10.1016/j.eja.2010.12.001
- ArcGIS 10.5 Help. (2016). *What is ArcMap?*
- Beguiria, S., Serrano, V. & Sawasawa, H. (2013). SPEI: Calculation of Standardised Precipitation-Evapotranspiration index. R package version 1.6. DOI:10.1175/2009JCLI2909.1.http
- Cai, J., Liu, Y., Lei, T. & Pereira, L. S. (2007). Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman–Monteith equation using daily weather forecast messages. *Agricultural and Forest Meteorology*, 145(1–2), 22–35. DOI: 10.1016/J.AGRFORMET.2007.04.012
- Campos, D. F. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. San Luis Potosí, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Campos, R. (2016). *Caracterización de la sequía en el Estado de San Luis Potosí, México*. Tesis de maestría en ciencias. Postgrado en Hidrociencias. Colegio de Postgraduados.
- Cancelliere, A. & Salas, J. D. (2010). Drought probabilities and return period for annual streamflows series. *Journal of Hydrology*, 391(1–2), 77–89. DOI:10.1016/j.jhydrol.2010.07.008
- CENAPRED. (2001). *Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México*. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Recuperado de <http://www.cenapred.unam.mx>
- CENAPRED. (2002). *Fascículo sequías*. Secretaría de Gobernación. México, DF. Recuperado de <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/8-FASCCULOSEQUAS.PDF>
- Childs, C. (2011). Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst. *Education*, 4.
- Chow, V., Maidment, D. & Mays, L. (1994). Hidrología aplicada. *Hidrología Aplicada*. Recuperado de <http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IsisScript=iah/iah.xis&src=google&base=REPIDISCA&lang=p&nextAction=lnk&exprSearch=158911&indexSearch=ID%5Cnhttp://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=BINA1.xis&method=post&formato=2&cantidad=>

- CONAGUA. (2018). Información Climatológica. Recuperado de <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica>
- Contreras, C. S. (2005). Las sequías en México durante el siglo XIX. *Investigaciones Geográficas*, (56), 118–133. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n56/n56a8.pdf>
- Dracup, J. A., Seong Lee, K. & Paulson, E. (1980). One the Definition of Droughts. *Water Resources Research*, 16(2), 297–302.
- Escobar, J. J., González, J. L., Sánchez, I., Muñoz, A. & Villa, M. (2012). Análisis de la lluvia y su relación con fenómenos del cambio climático; estudio de caso en estación meteorológica Sardinias (San Bernardo, Durango). *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, XI, 75–84.
- ESRI. (2016). ArcMap | ArcGIS Desktop 10.5.
- Flores Fuentes, S. (2018). Modelo predice sequías e inundaciones a partir de manchas solares - Ciencia UNAM. Recuperado de http://ciencia.unam.mx/leer/239/Modelo_predice_sequias_e_inundaciones_a_partir_de_manchas_solares
- Fuertes, S. J. & Javier, S. (1998). Evaluación de dos métodos de determinación de la evapotranspiración de referencia en condiciones semiáridas. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10261/16644>
- Gallegos, J., Arteaga, R., Vázquez, M. A. & Juárez, J. (2016). Estimation of missing daily precipitation and maximum and minimum temperature records in San Luis Potosí. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 8(1), 3–16. DOI:10.5154/r.inagbi.2015.11.008
- Gamboa, R. O. (2015). *Evaluación de modelos empíricos, matemáticos y redes neuronales para estimar datos faltantes en estaciones meteorológicas en México*. Tesis de maestría en ciencias. Postgrado en Hidrociencias. Colegio de Postgraduados.
- Goldman, D. (1985). Stochastic Analysis of Drought Phenomena. *US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center Stochastic*. Recuperado de <http://www.hec.usace.army.mil/publications/TrainingDocuments/TD-25.pdf>
- González, F. A. (2015). El Ciclo de las Manchas Solares y la Precipitación en la Región del Eje Cafetero - Colombia, 1–21. Recuperado de <http://arxiv.org/abs/1512.05412>
- Granados, D., Sánchez, A., Granados, R. L. & Borja, A. (2011). Los procesos de desertificación y las regiones áridas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, XVII, 247–258. DOI: 10.5154/r.rchscfa.

- Heim, R. R. (2002). A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1149–1165. DOI: 10.1175/1520-0477(2002)083<1149:AROTDI>2.3.CO;2
- Hounam, C. E., Burgos, J. J., Kalik, M. S., Palmer, W. C. & Rodda, J. (1975). Drought and Agriculture. *World Meteorological Organization*.
- Ibarrarán, M. E. & Rodríguez, M. (2007). *Estudio sobre Economía del Cambio Climático en México*. Recuperado de <http://inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/e2007h.pdf>
- INEGI. (2005). *Información de Climas (escala 1:1000000). Guía para la interpretación de Cartografía Climatológica*. DOI:10.1103/PhysRevA.85.053405
- INEGI. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Durango 2017*. Recuperado de http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2015/702825077174.pdf
- Infante, S. & Zarate, G. P. (2012). *Métodos Estadísticos. Un enfoque interdisciplinario* (3a Edición). Colegio de Postgraduados.
- Jacques Coper, M. S. (2009). *Caracterización del salto climático de mediados de los 1970s en Sudamérica*. Tesis de master en ciencias. Departamento de Geofísica. Universidad de Chile.
- Kent State University. (2018). Statistical & Qualitative Data Analysis Software: About R and RStudio. Recuperado de <https://libguides.library.kent.edu/statconsulting>
- Landa, R., Magaña, V., & Neri, C. (2008). *Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático*. Recuperado de http://www.escueladeadministracionpublica.df.gob.mx/gird2014/images/AGUA_y_CLIMA_Elementos_para_la_adaptacion_al_Cambio_Climatico.pdf
- Lehmann, E. L., & Casella, G. (1998). *Theory of Point Estimation , Second Edition Springer Texts in Statistics. Design* (Vol. 41). DOI: 10.2307/1270597
- Lilliefors, H. W. (1967). On the Kolmogorov-Smirnov Test for Normality with Mean and Variance Unknown. *Journal of Statistical Association*, 62(318), 399–402. DOI: 200.130.19.152
- Mavromatis, T. (2007). Drought index evaluation for assessing future wheat production in Greece. *International Journal Of Climatology*, 27(December 2007), 911–924. DOI:10.1002/joc
- Mckee, T. B., Doesken, N. J. & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *AMS 8th Conference on Applied*

- Climatology*, (January), 179–184. DOI: citeulike-article-id:10490403
- Miller, A. J., Cayan, D. R. & Barnett, T. P. (1994). The 1976-77 climate shift of the Pacific Ocean. *Oceanography*, 7(1), 21–26.
- Montgomery, D. C. (2010). *Diseño y análisis de experimentos* (2a.). México, DF: Limusa Wiley.
- Organización Meteorológica Mundial. (2016). *Manual de indicadores e índices de sequía. Programa de gestión integrada de sequías*. Recuperado de http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO-GWP_Manual-de-indicadores_2016
- Ortega, D. (2013). Sequía : causas y efectos de un fenómeno global. *Ciencia y Sociedad*, 16(61), 8–15. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/260163188>
- Oxford Dictionary. (2018). fair | Definition of fair in English by Oxford Dictionaries. Recuperado de <https://en.oxforddictionaries.com/definition/drought>
- Pedrosa, I., Juarros, J., Robles, A., Basteiro, J. & García, E. (2015). Pruebas de bondad de ajuste en distribuciones simétricas, ¿qué estadístico utilizar? *Universitas Psychologica*, 14(1), 15–27. DOI: 10.11144/Javeriana.upsy
- Real Academia Española. (2014). Diccionario de la lengua española - Edición del Tricentenario. Recuperado de <http://dle.rae.es/?id=XdxVMuV>
- Rivera del Río, R. (2005). *Comportamiento espacio temporal de la sequía en el Estado de Durango, México*. Tesis de maestría en ciencias. Postgrado en Hidrociencias. Colegio de Postgraduados.
- Rodionov, S. (2004). A sequential algorithm for testing climate regime shifts. *Geophysical Research Letters*, 31(9), 2–5. DOI: 10.1029/2004GL019448
- Rodionov, S. (2005). A brief overview of the regime shift detection methods. In: Large-Scale Disturbances (Regime Shifts) and Recovery in Aquatic Ecosystems: Challenges for Management Toward Sustainability, V. Velikova and N. Chipev (Eds.), UNESCO-ROSTE/BAS Workshop on Regime Shifts, 14-16 June 2005, Varna, Bulgaria, 17-24. Recuperado de https://www.beringclimate.noaa.gov/regimes/rodionov_overview.pdf
- Rodionov, S. (2006). Help with regime shift detection software. Recuperado de <https://www.beringclimate.noaa.gov/regimes/help3.html>
- Rodionov, S. & Overland, J. (2005). Application of a sequential regime shift detection method to the Bering Sea ecosystem. *Journal of Marine Science*, 62(May), 328–332. DOI: 10.1016/j.icesjms.2005.01.013

- Ruiz Álvarez, O., Arteaga Ramírez, R., Vázquez Peña, M., Ontiveros Capurata, R. & López López, R. (2012). Balance Hídrico Y Clasificación Climática Del Estado De Tabasco , México. *Universidad y Ciencia Trópico Húmedo*, 28(1), 1–14. Recuperado de <http://www.universidadyciencia.ujat.mx/sistema/documentos/volumenes/28-1-2012/714.pdf>
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., ... Goldberg, M. (2010). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8), 1015–1058. DOI: 10.1175/2010BAMS3001.1
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., ... Becker, E. (2014). The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate*, 27(6), 2185–2208. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1
- Sánchez Algarra, P., Barraza Sánchez, X., Reverter Comas, F. & Vegas Lozano, E. (2006). *Métodos estadísticos aplicados*. Barcelona: Universitat de Barcelona.
- SEMARNAT. (2009a). *Cambio climático. Ciencia, evidencia y acciones. Naciones Unidas*. México, DF. Recuperado de <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/climate-change/index.html>
- SEMARNAT. (2009b). Programa Hídrico Visión 2030 del Estado de Durango. Gobierno Federal.
- Shahabuddin, F. A. A., Ibrahim, K. & Jemain, A. A. (2009). On the Comparison of Several Goodness of Fit tests under Simple Random Sampling and Ranked Set Sampling, 3(6), 406–409.
- Vicente, S. M., Beguería, S. & López, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1
- Villatoro, M., Henríquez, C. & Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores idw y kriging en la variación espacial de ph, ca, cice y p del suelo. *Agronomía Costarricense*, 32(1), 95–105.
- Wilhite, D. A. & Glantz, M. H. (1985). Understanding: The drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, 10(3), 111–120. DOI:10.1080/02508068508686328
- Willmott, C. J. (1982). Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *American Meteorological Society*, 63(11), 1309–1313. DOI:10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2
- WMO, W. M. O., & UNESCO, U. N. E. and S. O. (1998). *International Glossary of Hydrology. IHP/OHP-Berichte*. Recuperado de

http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/publications/international_glossary/385_I_GH_2012.pdf

Wolchover, N. (2014). What is Drought? (pp. 1–3). The National Drought Mitigation Center. Recuperado de <http://drought.unl.edu/DroughtBasics/WhatisDrought.aspx>

Yevjevich, V. (1967). An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. *Hydrology Papers* 23, (23), 25. DOI:10.1016/0022-1694(69)90110-3

ANEXOS

Anexo 1. Resultados de la evaluación de los métodos de relleno de datos faltantes a través de índices estadísticos

Temperatura máxima

Clave estación	Método US-NWS					Malla CFR				
	MSE	RMSE	MAE	d	R ²	MSE	RMSE	MAE	d	R ²
10001	12.90	3.59	3.12	0.84	0.67	13.81	3.72	2.97	0.80	0.52
10004	1.70	1.31	0.89	0.98	0.93	5.68	2.38	2.20	0.93	0.94
10005	16.26	4.03	3.03	0.89	0.67	8.54	2.92	2.38	0.93	0.86
10006	5.45	2.33	2.01	0.92	0.90	0.85	0.92	0.75	0.99	0.95
10012	14.75	3.84	3.40	0.82	0.79	21.31	4.62	3.97	0.74	0.67
10016	9.24	3.04	2.30	0.86	0.59	14.46	3.80	3.06	0.78	0.55
10021	3.22	1.79	1.45	0.96	0.91	6.76	2.60	2.27	0.91	0.91
10023	4.25	2.06	1.68	0.92	0.78	5.67	2.38	2.07	0.90	0.66
10024	6.72	2.59	2.08	0.88	0.64	5.85	2.42	2.09	0.90	0.72
10026	30.76	5.55	4.99	0.62	0.54	5.93	2.44	1.95	0.89	0.67
10029	5.98	2.45	2.03	0.92	0.83	9.12	3.02	2.53	0.88	0.83
10030	7.63	2.76	1.98	0.87	0.66	2.45	1.57	1.20	0.95	0.82
10035	3.14	1.77	1.44	0.95	0.90	9.05	3.01	2.82	0.87	0.92
10037	9.89	3.14	2.78	0.86	0.81	96.89	9.84	9.71	0.49	0.83
10045	10.05	3.17	2.55	0.91	0.79	8.31	2.88	2.32	0.92	0.79
10048	3.27	1.81	1.42	0.91	0.70	2.63	1.62	1.22	0.94	0.81
10049	3.22	1.80	1.26	0.96	0.86	7.66	2.77	2.42	0.90	0.90
10051	4.87	2.21	1.83	0.90	0.76	3.77	1.94	1.59	0.92	0.77
10052	3.48	1.87	1.50	0.93	0.86	2.64	1.63	1.33	0.95	0.87
10054	5.75	2.40	1.86	0.88	0.70	2.04	1.43	1.14	0.96	0.91
10057	3.54	1.88	1.53	0.93	0.80	2.48	1.58	1.30	0.95	0.88
10061	43.81	6.62	5.92	0.65	0.58	21.62	4.65	3.92	0.77	0.69
10066	9.94	3.15	2.10	0.84	0.56	9.70	3.11	2.06	0.85	0.54
10072	9.09	3.02	2.37	0.89	0.71	19.74	4.44	3.91	0.77	0.64
10074	5.48	2.34	2.03	0.92	0.83	1.10	1.05	0.83	0.98	0.93
10076	14.87	3.86	3.52	0.79	0.83	14.82	3.85	3.36	0.80	0.78
10078	9.34	3.06	2.62	0.89	0.75	5.84	2.42	1.96	0.92	0.87
10085	8.36	2.89	2.15	0.93	0.75	2.80	1.67	1.34	0.98	0.96
10087	5.96	2.44	1.87	0.87	0.63	7.61	2.76	2.56	0.89	0.90
10088	2.30	1.52	1.09	0.95	0.84	1.26	1.12	0.91	0.97	0.93
10090	13.26	3.64	2.73	0.81	0.57	5.10	2.26	1.70	0.91	0.70
10093	3.17	1.78	1.35	0.92	0.76	3.33	1.82	1.42	0.90	0.70

Clave estación	Método US-NWS					Malla CFSR				
	MSE	RMSE	MAE	d	R ²	MSE	RMSE	MAE	d	R ²
10098	5.40	2.32	1.82	0.93	0.86	7.41	2.72	2.37	0.89	0.82
10099	19.37	4.40	3.37	0.69	0.24	14.61	3.82	2.77	0.76	0.43
10100	7.60	2.76	2.08	0.89	0.77	2.62	1.62	1.29	0.96	0.88
10103	2.05	1.43	1.14	0.95	0.87	1.48	1.22	0.98	0.96	0.86
10121	10.68	3.27	2.91	0.81	0.73	2.65	1.63	1.24	0.95	0.88
10129	25.52	5.05	4.31	0.77	0.68	5.12	2.26	1.83	0.93	0.90
10131	9.99	3.16	2.50	0.83	0.52	13.03	3.61	3.03	0.80	0.67
10132	7.54	2.75	2.05	0.92	0.77	25.76	5.08	4.65	0.77	0.83
10135	7.50	2.74	2.40	0.87	0.77	5.17	2.27	1.82	0.90	0.68
10137	42.04	6.48	5.03	0.69	0.41	72.16	8.49	7.20	0.58	0.37
10138	6.09	2.47	1.98	0.93	0.81	22.19	4.71	4.40	0.78	0.89
10139	7.11	2.67	2.14	0.93	0.85	3.99	2.00	1.51	0.95	0.90
10140	10.27	3.20	2.62	0.89	0.64	16.22	4.03	3.18	0.81	0.62
10141	26.81	5.18	4.65	0.73	0.70	7.73	2.78	2.44	0.89	0.81
10144	19.66	4.43	3.84	0.81	0.52	10.22	3.20	2.82	0.88	0.72
10147	25.78	5.08	4.47	0.75	0.58	8.18	2.86	2.44	0.89	0.86
10149	18.04	4.25	3.55	0.79	0.66	19.14	4.38	4.15	0.80	0.90
10165	5.28	2.30	1.78	0.95	0.88	3.90	1.98	1.60	0.96	0.92
5027	18.77	4.33	3.16	0.83	0.54	15.11	3.89	2.76	0.86	0.62
5029	10.61	3.26	2.34	0.88	0.61	7.18	2.68	2.02	0.90	0.77
32028	1.97	1.41	1.08	0.97	0.88	5.32	2.31	1.81	0.90	0.82
32065	2.87	1.69	1.28	0.94	0.78	3.90	1.98	1.59	0.92	0.80
5004	9.27	3.04	2.38	0.90	0.72	7.41	2.72	2.17	0.91	0.76
8171	5.56	2.36	1.96	0.96	0.88	2.94	1.72	1.38	0.97	0.92
25041	8.83	2.97	2.48	0.85	0.75	43.61	6.60	6.35	0.58	0.76
25074	61.52	7.84	7.61	0.34	0.52	23.76	4.87	4.74	0.49	0.72
25183	1.93	1.39	1.10	0.94	0.79	2.31	1.52	1.21	0.93	0.77

Temperatura mínima

Clave estación	Método US-NWS					Malla CFSR				
	MSE	RMSE	MAE	d	R ²	MSE	RMSE	MAE	d	R ²
10001	8.92	2.99	2.65	0.88	0.71	7.39	2.72	2.43	0.89	0.71
10004	5.11	2.26	2.00	0.96	0.95	4.06	2.01	1.64	0.96	0.95
10005	7.32	2.70	1.93	0.95	0.83	13.79	3.71	3.18	0.91	0.92
10006	13.47	3.67	3.25	0.90	0.93	21.15	4.60	4.01	0.83	0.94
10012	12.61	3.55	3.35	0.85	0.92	3.23	1.80	1.49	0.96	0.93
10016	7.53	2.74	2.06	0.91	0.72	8.18	2.86	2.19	0.88	0.62
10021	5.31	2.30	1.91	0.95	0.95	8.69	2.95	2.41	0.91	0.88

Clave estación	Método US-NWS					Malla CFSR				
	MSE	RMSE	MAE	d	R ²	MSE	RMSE	MAE	d	R ²
10023	5.18	2.28	1.94	0.94	0.79	7.43	2.72	2.25	0.90	0.68
10024	3.67	1.92	1.51	0.96	0.89	4.51	2.12	1.68	0.94	0.86
10026	33.68	5.80	4.98	0.76	0.60	23.86	4.88	4.23	0.80	0.63
10029	7.91	2.81	2.26	0.93	0.85	5.90	2.43	1.99	0.93	0.81
10030	4.04	2.01	1.18	0.96	0.85	3.10	1.76	1.46	0.96	0.94
10035	3.83	1.96	1.58	0.97	0.93	5.24	2.29	1.99	0.95	0.92
10037	4.59	2.14	1.13	0.94	0.82	133.35	11.55	11.38	0.49	0.84
10045	12.98	3.60	3.02	0.89	0.77	16.23	4.03	3.47	0.86	0.74
10048	13.95	3.74	2.93	0.89	0.70	22.61	4.75	3.75	0.79	0.71
10049	4.64	2.15	1.66	0.97	0.93	7.23	2.69	2.10	0.94	0.92
10051	11.96	3.46	2.86	0.89	0.78	16.37	4.05	3.44	0.82	0.84
10052	1.74	1.32	0.95	0.98	0.92	2.65	1.63	1.27	0.96	0.91
10054	4.65	2.16	1.75	0.95	0.89	3.97	1.99	1.67	0.94	0.91
10057	2.58	1.61	1.23	0.96	0.91	3.96	1.99	1.43	0.94	0.80
10061	13.37	3.66	3.21	0.91	0.87	53.03	7.28	6.88	0.71	0.88
10066	11.32	3.37	2.43	0.86	0.68	10.69	3.27	2.48	0.85	0.59
10072	22.91	4.79	2.95	0.79	0.47	27.84	5.28	3.77	0.74	0.46
10074	6.40	2.53	2.02	0.93	0.82	22.45	4.74	4.47	0.80	0.93
10076	12.04	3.47	2.98	0.87	0.82	10.35	3.22	2.76	0.87	0.83
10078	8.51	2.92	2.65	0.94	0.94	7.02	2.65	2.10	0.93	0.92
10085	12.36	3.52	2.78	0.91	0.73	12.78	3.57	3.27	0.92	0.97
10087	18.10	4.25	3.26	0.83	0.63	12.06	3.47	3.35	0.88	0.96
10088	1.71	1.31	0.95	0.98	0.93	2.57	1.60	1.30	0.97	0.91
10090	5.20	2.28	1.79	0.95	0.81	7.14	2.67	2.20	0.90	0.80
10093	6.98	2.64	2.06	0.93	0.78	39.07	6.25	5.78	0.72	0.83
10098	3.11	1.76	1.26	0.97	0.92	3.98	1.99	1.62	0.96	0.96
10099	16.08	4.01	3.20	0.77	0.41	22.02	4.69	3.86	0.74	0.57
10100	3.30	1.82	1.44	0.97	0.92	21.31	4.62	4.39	0.82	0.93
10103	19.55	4.42	3.69	0.86	0.80	36.42	6.04	5.61	0.76	0.91
10121	61.65	7.85	6.91	0.67	0.58	22.40	4.73	4.48	0.84	0.94
10129	8.42	2.90	2.56	0.93	0.89	16.13	4.02	3.41	0.85	0.94
10131	28.00	5.29	4.62	0.75	0.68	25.44	5.04	4.45	0.75	0.71
10132	14.83	3.85	2.79	0.88	0.74	3.00	1.73	1.30	0.97	0.91
10135	2.77	1.66	1.23	0.96	0.88	2.96	1.72	1.34	0.95	0.87
10137	8.52	2.92	2.19	0.92	0.74	10.86	3.30	2.63	0.87	0.70
10138	7.36	2.71	2.33	0.95	0.94	5.20	2.28	1.98	0.95	0.92
10139	6.19	2.49	1.92	0.95	0.91	6.42	2.53	2.04	0.95	0.95
10140	23.49	4.85	3.92	0.78	0.44	27.32	5.23	4.31	0.74	0.30
10141	8.16	2.86	2.48	0.94	0.89	19.22	4.38	3.99	0.85	0.93

Clave estación	Método US-NWS					Malla CFSR				
	MSE	RMSE	MAE	d	R ²	MSE	RMSE	MAE	d	R ²
10144	31.48	5.61	4.74	0.77	0.70	29.33	5.42	4.78	0.77	0.76
10147	45.75	6.76	5.91	0.74	0.70	66.55	8.16	7.79	0.68	0.88
10149	9.11	3.02	2.39	0.90	0.77	11.25	3.35	2.80	0.90	0.84
10165	5.02	2.24	1.59	0.97	0.91	5.09	2.26	1.75	0.96	0.95
5027	15.80	3.97	3.03	0.86	0.56	14.52	3.81	2.90	0.87	0.62
5029	8.32	2.88	2.18	0.93	0.76	6.33	2.52	1.92	0.94	0.87
32028	5.97	2.44	1.93	0.93	0.86	2.24	1.50	1.16	0.96	0.89
32065	3.51	1.87	1.52	0.93	0.86	3.50	1.87	1.58	0.93	0.85
5004	18.89	4.35	3.74	0.88	0.79	26.81	5.18	4.69	0.80	0.84
8171	5.35	2.31	1.85	0.97	0.89	17.02	4.13	3.79	0.90	0.95
25041	4.59	2.14	1.75	0.95	0.89	10.03	3.17	2.95	0.86	0.95
25074	16.01	4.00	3.38	0.75	0.53	3.66	1.91	1.33	0.89	0.68
25183	3.13	1.77	1.36	0.96	0.87	3.43	1.85	1.41	0.94	0.89

Precipitación

Clave estación	Método US-NWS					Malla CFSR				
	MSE	RMSE	MAE	d	R ²	MSE	RMSE	MAE	d	R ²
10001	750.80	27.40	14.09	0.91	0.71	14489.38	120.37	67.07	0.60	0.58
10004	409.54	20.24	9.85	0.92	0.73	1081.45	32.89	17.23	0.81	0.47
10005	1066.57	32.66	14.35	0.74	0.35	1100.73	33.18	17.58	0.76	0.39
10006	991.39	31.49	17.73	0.94	0.79	3454.64	58.78	31.55	0.88	0.76
10012	520.82	22.82	12.18	0.93	0.77	4670.29	68.34	35.16	0.72	0.60
10016	1860.59	43.13	23.60	0.87	0.60	4060.21	63.72	36.41	0.80	0.54
10021	607.13	24.64	12.27	0.92	0.73	2649.76	51.48	27.29	0.80	0.61
10023	792.71	28.16	15.47	0.95	0.81	1720.98	41.48	23.87	0.88	0.61
10024	513.73	22.67	13.28	0.96	0.84	1646.16	40.57	23.70	0.81	0.57
10026	3087.05	55.56	34.98	0.86	0.63	3171.79	56.32	35.93	0.89	0.66
10029	3208.94	56.65	24.59	0.86	0.68	5071.00	71.21	34.83	0.80	0.46
10030	1449.77	38.08	15.81	0.88	0.62	7806.34	88.35	46.55	0.73	0.56
10035	865.10	29.41	16.87	0.94	0.82	2933.71	54.16	29.42	0.84	0.74
10037	5986.75	77.37	46.60	0.81	0.59	22228.03	149.09	83.91	0.61	0.47
10045	968.45	31.12	16.66	0.78	0.55	2619.99	51.19	26.02	0.74	0.42
10048	1411.56	37.57	21.08	0.94	0.78	6469.92	80.44	47.88	0.82	0.61
10049	519.71	22.80	11.45	0.91	0.69	1754.44	41.89	21.83	0.79	0.54
10051	1031.24	32.11	19.23	0.94	0.81	2716.75	52.12	31.60	0.89	0.69
10052	750.05	27.39	15.02	0.94	0.80	1627.43	40.34	22.92	0.89	0.66
10054	785.69	28.03	14.96	0.95	0.81	1563.07	39.54	22.61	0.88	0.64
10057	478.01	21.86	12.03	0.96	0.84	1104.07	33.23	19.66	0.90	0.66

Clave estación	Método US-NWS					Malla CFSR				
	MSE	RMSE	MAE	d	R ²	MSE	RMSE	MAE	d	R ²
10061	1262.86	35.54	16.82	0.88	0.68	1725.98	41.54	22.97	0.75	0.35
10066	551.20	23.48	14.00	0.95	0.83	1951.25	44.17	24.74	0.72	0.43
10072	478.61	21.88	11.96	0.91	0.70	7400.96	86.03	44.78	0.63	0.60
10074	632.05	25.14	14.02	0.93	0.75	1192.51	34.53	20.26	0.80	0.48
10076	636.39	25.23	13.06	0.96	0.86	2132.71	46.18	26.60	0.86	0.57
10078	1189.96	34.50	16.32	0.93	0.75	1470.27	38.34	20.69	0.89	0.65
10085	494.64	22.24	12.42	0.83	0.48	993.87	31.53	17.12	0.74	0.35
10087	5150.98	71.77	42.84	0.91	0.72	9502.74	97.48	61.66	0.86	0.59
10088	452.04	21.26	12.16	0.96	0.86	1470.50	38.35	21.54	0.83	0.61
10090	665.26	25.79	14.12	0.95	0.84	1348.86	36.73	21.45	0.91	0.70
10093	3836.74	61.94	34.94	0.87	0.60	47613.32	218.20	123.32	0.60	0.57
10098	757.23	27.52	14.64	0.89	0.68	1272.79	35.68	19.15	0.84	0.52
10099	816.78	28.58	16.19	0.84	0.52	1116.18	33.41	18.01	0.76	0.35
10100	1424.85	37.75	21.14	0.90	0.75	3455.89	58.79	33.28	0.73	0.40
10103	1107.93	33.29	18.97	0.95	0.82	13394.95	115.74	66.90	0.75	0.72
10121	1012.90	31.83	19.85	0.96	0.84	7462.85	86.39	51.47	0.82	0.72
10129	775.07	27.84	15.60	0.93	0.84	1613.54	40.17	22.47	0.88	0.61
10131	718.92	26.81	13.98	0.92	0.74	4054.61	63.68	33.84	0.80	0.66
10132	717.76	26.79	13.45	0.88	0.61	7910.93	88.94	46.53	0.62	0.49
10135	907.67	30.13	15.79	0.92	0.75	6680.35	81.73	44.95	0.76	0.63
10137	758.62	27.54	16.11	0.94	0.81	6356.15	79.73	44.03	0.73	0.62
10138	2882.56	53.69	28.45	0.75	0.53	2157.56	46.45	24.17	0.85	0.59
10139	749.00	27.37	14.58	0.85	0.57	1424.84	37.75	19.83	0.74	0.36
10140	609.48	24.69	13.53	0.87	0.59	15509.21	124.54	66.20	0.48	0.49
10141	1340.30	36.61	18.62	0.85	0.69	2253.66	47.47	25.73	0.77	0.40
10144	1011.58	31.81	17.00	0.91	0.71	3694.68	60.78	32.21	0.81	0.59
10147	2860.66	53.49	29.01	0.74	0.37	2902.31	53.87	29.96	0.72	0.34
10149	1185.36	34.43	17.93	0.87	0.64	1530.59	39.12	20.70	0.85	0.53
10165	790.71	28.12	15.54	0.81	0.49	1332.69	36.51	19.16	0.74	0.43
5027	1029.36	32.08	16.57	0.66	0.26	1268.11	35.61	18.26	0.57	0.15
5029	1424.00	37.74	16.87	0.72	0.40	784.97	28.02	15.11	0.80	0.47
32028	713.30	26.71	14.44	0.92	0.74	7134.36	84.47	47.98	0.73	0.69
32065	1402.55	37.45	19.80	0.88	0.69	2493.10	49.93	29.50	0.86	0.57
5004	456.43	21.36	11.95	0.79	0.41	2331.22	48.28	27.16	0.59	0.33
8171	744.15	27.28	13.60	0.83	0.54	1388.23	37.26	19.09	0.68	0.25
25041	1802.10	42.45	24.04	0.96	0.86	20855.09	144.41	71.64	0.80	0.75
25074	8629.04	92.89	54.34	0.79	0.63	22195.80	148.98	76.26	0.81	0.69
25183	5876.75	76.66	33.06	0.86	0.64	8133.13	90.18	45.69	0.81	0.50

Anexo 2. Ocurrencia de las categorías de clasificación de los índices de sequía

SPEI

Clave estación	3 meses							6 meses						
	Ext húm	Muy húm	Mod húm	C normal	Mod seco	Muy seco	Ext seco	Ext húm	Muy húm	Mod húm	C normal	Mod seco	Muy seco	Ext seco
10001	4	25	32	244	23	23	4	4	21	32	234	35	19	4
10004	5	22	30	239	36	21	2	4	21	39	216	54	13	2
10005	10	13	31	248	28	18	7	12	9	29	242	32	18	7
10006	3	19	48	215	55	15	0	1	26	41	216	42	22	1
10012	0	26	40	227	37	24	1	2	23	44	222	35	18	5
10016	0	24	44	216	61	10	0	0	29	28	203	82	7	0
10021	2	21	47	224	40	15	6	4	18	54	224	27	16	6
10023	11	8	34	236	45	17	4	10	8	27	241	37	24	2
10024	5	14	44	230	38	22	2	8	12	33	237	37	22	0
10026	6	18	42	221	51	16	1	9	14	37	226	46	13	4
10029	6	23	37	235	36	14	4	9	13	38	239	21	26	3
10030	6	19	38	226	45	19	2	1	25	37	220	53	13	0
10035	10	11	41	233	42	15	3	8	9	38	239	34	18	3
10037	9	15	27	246	35	21	2	5	17	42	221	37	27	0
10045	4	23	37	239	24	21	7	0	28	28	236	27	29	1
10047	4	17	42	229	40	23	0	5	24	26	233	42	14	5
10048	4	23	37	239	34	14	4	5	18	47	224	36	15	4
10049	0	29	31	231	44	17	3	0	27	31	225	50	16	0
10051	6	13	43	232	36	23	2	3	10	53	212	55	15	1
10052	5	20	37	235	35	20	3	4	16	42	229	30	28	0
10054	9	19	27	233	52	15	0	4	19	31	229	47	18	1
10057	4	24	33	240	34	18	2	1	25	36	231	32	22	2
10061	0	25	38	232	43	11	6	4	17	40	228	44	12	4
10066	4	27	28	240	37	13	6	1	25	34	227	39	19	4
10072	5	17	44	221	56	12	0	8	14	36	228	47	16	0
10074	3	21	41	227	40	20	3	4	26	28	223	52	14	2
10076	8	10	43	241	21	30	2	7	15	36	248	13	25	5
10078	5	17	41	225	46	17	4	6	16	34	229	39	25	0
10085	2	30	30	234	42	13	4	0	31	26	236	36	16	4
10087	3	25	41	228	38	19	1	0	31	31	230	41	13	3
10088	1	27	37	230	44	14	2	3	19	50	225	37	12	3
10090	2	23	35	230	48	13	4	1	20	44	217	42	25	0
10093	1	28	35	229	46	14	2	1	30	35	218	47	18	0
10098	5	18	47	219	47	19	0	1	17	49	216	45	20	1
10099	1	32	30	231	36	21	4	5	18	35	231	36	20	4
10100	10	13	35	242	32	18	5	2	25	44	214	42	16	6

Clave estación	3 meses							6 meses						
	Ext húm	Muy húm	Mod húm	C normal	Mod seco	Muy seco	Ext seco	Ext húm	Muy húm	Mod húm	C normal	Mod seco	Muy seco	Ext seco
10103	6	19	30	235	43	21	1	7	17	23	235	46	20	1
10108	5	16	50	223	41	20	0	2	21	40	220	49	17	0
10121	8	15	33	242	34	12	9	11	6	30	259	22	13	8
10129	7	10	51	216	49	21	1	6	17	32	223	51	19	1
10131	2	25	38	232	37	21	0	0	16	48	223	41	19	2
10132	8	10	46	232	42	13	4	6	11	51	213	46	22	0
10135	9	21	28	241	28	22	6	4	27	30	228	40	15	5
10137	5	17	29	234	41	29	0	0	23	31	234	25	36	0
10138	2	20	44	212	62	15	0	2	21	50	213	48	13	2
10139	3	22	43	226	45	15	1	0	24	46	206	65	8	0
10140	0	25	47	213	54	14	2	1	18	45	218	43	24	0
10141	7	16	38	236	33	23	2	10	5	56	218	43	17	0
10144	5	20	29	241	36	22	2	6	17	40	226	30	28	2
10147	5	24	37	238	30	14	7	3	20	39	224	42	17	4
10149	2	25	32	236	40	17	3	5	22	29	246	20	18	9
10165	3	21	41	224	49	13	4	1	19	49	213	51	10	6
5027	10	15	29	251	32	7	11	10	18	20	251	32	4	14
5029	3	23	46	215	55	10	3	1	31	34	217	49	16	1
32028	1	27	38	230	38	20	1	2	24	43	233	27	13	7
32065	4	19	43	222	49	16	2	0	25	38	205	70	11	0
5004	6	15	44	229	36	24	1	3	22	43	224	32	18	7
8171	7	12	47	238	35	5	11	6	18	44	224	43	6	8
25041	8	14	33	234	39	27	0	7	20	34	228	30	27	3
25074	7	14	36	246	31	13	8	0	20	45	224	45	5	10
25183	7	21	29	239	30	24	5	5	28	22	243	30	12	9
Total	293	1205	2308	14132	2456	1073	186	240	1206	2297	13817	2471	1072	186

SPI

Clave estación	3 meses							6 meses						
	Ext húm	Muy húm	Mod húm	C normal	Mod seco	Muy seco	Ext seco	Ext húm	Muy húm	Mod húm	C normal	Mod seco	Muy seco	Ext seco
10001	7	11	35	251	24	18	9	1	22	30	247	20	14	15
10004	5	19	32	243	22	28	6	4	24	33	239	28	17	4
10005	5	21	33	247	29	16	4	14	12	31	263	16	9	4
10006	3	15	50	220	49	14	4	2	17	43	226	43	14	4
10012	4	17	41	238	28	18	9	6	8	48	229	33	19	6
10016	1	19	42	229	43	18	3	0	19	34	228	37	30	1
10021	2	17	41	236	38	18	3	1	18	46	222	35	27	0
10023	11	10	32	249	25	16	12	7	8	41	231	44	7	11

Clave estación	3 meses							6 meses						
	Ext húm	Muy húm	Mod húm	C normal	Mod seco	Muy seco	Ext seco	Ext húm	Muy húm	Mod húm	C normal	Mod seco	Muy seco	Ext seco
10024	5	11	41	244	29	9	16	1	18	36	236	30	8	20
10026	7	18	36	246	30	10	8	11	14	28	240	38	17	1
10029	12	18	21	256	30	11	7	17	8	18	263	37	6	0
10030	12	11	30	236	44	17	5	11	14	28	234	43	18	1
10035	8	9	41	246	29	13	9	10	5	34	248	34	9	9
10037	12	17	26	246	36	14	4	18	4	17	257	36	16	1
10045	7	12	33	244	38	10	11	5	16	24	252	29	11	12
10047	6	16	40	240	26	20	7	6	19	24	251	23	19	7
10048	7	18	34	245	30	14	7	6	17	38	233	32	18	5
10049	1	15	46	225	34	22	12	2	18	31	236	34	27	1
10051	7	9	42	237	38	10	12	6	13	41	230	37	14	8
10052	6	17	35	248	27	18	4	6	9	46	245	15	20	8
10054	11	12	29	248	33	16	6	16	5	31	245	35	13	4
10057	4	23	33	241	35	15	4	1	30	33	232	36	17	0
10061	3	17	36	234	41	15	9	2	24	30	243	33	9	8
10066	5	20	36	241	30	15	8	7	13	25	257	20	13	14
10072	5	16	33	235	43	13	10	7	12	31	239	37	19	4
10074	4	16	40	240	28	20	7	4	24	29	225	50	10	7
10076	7	12	43	237	37	11	8	7	8	43	238	35	12	6
10078	6	13	39	234	35	18	10	9	10	40	233	31	19	7
10085	6	19	31	242	37	10	10	8	22	23	246	31	7	12
10087	8	18	35	239	40	12	3	5	23	30	241	35	14	1
10088	5	23	36	233	34	18	6	8	20	41	231	39	8	2
10090	4	10	48	229	42	16	6	3	7	57	204	58	18	2
10093	4	22	28	251	37	8	5	9	27	22	244	33	13	1
10098	3	19	38	232	53	8	2	2	10	48	219	50	19	1
10099	9	10	38	248	23	26	1	5	13	36	240	26	11	18
10100	9	15	28	253	25	15	10	6	21	24	257	15	15	11
10103	9	15	25	249	34	15	8	16	7	28	242	37	16	3
10108	1	19	36	241	30	22	6	1	21	34	226	50	11	6
10121	10	7	29	263	26	18	2	12	3	20	275	24	14	1
10129	3	11	41	231	36	25	8	6	5	43	227	43	11	14
10131	3	26	30	239	37	15	5	3	17	34	236	39	19	1
10132	7	12	36	242	29	23	6	7	10	36	233	38	17	8
10135	8	15	33	244	29	12	14	11	10	19	255	27	14	13
10137	1	19	39	236	34	16	10	0	13	41	236	22	17	20
10138	6	18	31	239	45	11	5	13	4	42	229	55	6	0
10139	5	13	43	240	36	16	2	5	18	35	236	42	4	9
10140	1	14	47	228	41	12	12	0	8	51	227	25	26	12

Clave estación	3 meses							6 meses						
	Ext húm	Muy húm	Mod húm	C normal	Mod seco	Muy seco	Ext seco	Ext húm	Muy húm	Mod húm	C normal	Mod seco	Muy seco	Ext seco
10141	8	8	36	256	17	17	13	10	7	42	256	11	6	17
10144	9	18	24	247	39	14	4	6	19	31	254	23	10	6
10147	2	23	37	249	19	15	10	7	9	45	248	15	13	12
10149	8	14	37	238	31	18	9	14	9	26	246	29	15	10
10165	4	11	43	237	35	19	6	3	13	46	225	40	17	5
5027	9	14	31	250	30	21	0	4	20	26	244	24	14	17
5029	5	19	37	245	32	13	4	9	13	24	246	40	14	3
32028	4	20	37	238	36	15	5	0	22	38	228	51	7	3
32065	5	12	36	247	29	13	13	0	10	48	229	26	26	10
5004	6	17	40	238	34	19	1	0	27	29	237	40	11	5
8171	4	16	38	235	36	23	3	6	10	37	225	51	16	4
25041	9	18	25	245	29	26	3	9	18	25	245	25	25	2
25074	8	7	36	255	26	9	14	1	17	41	239	22	18	11
25183	11	20	20	251	37	14	2	12	17	28	240	37	10	5
Total	367	951	2169	14746	2029	971	422	388	879	2083	14588	2044	894	413